

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FAULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ESCOMBREIRAS E
ANÁLISE CINEMÁTICAS DE TALUDES DE CORTA.
APLICAÇÃO À MINA DE SANTO ANTÓNIO, PENEDONO.**

Ema Maria Tomé Aldeano

**Dissertação para obtenção do grau de
mestre**

MESTRADO EM GEOLOGIA APLICADA

(Especialização em Geologia de Engenharia)

2014

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ESCOMBREIRAS E
ANÁLISE CINEMÁTICAS DE TALUDES DE CORTA.
APLICAÇÃO À MINA DE SANTO ANTÓNIO, PENEDONO.**

Ema Maria Tomé Aldeano

Tese orientada por:

Doutora Magda Cristina Rodrigues Roque (orientadora: Professora Auxiliar
Convidada da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de
Geologia)

MESTRADO EM GEOLOGIA APLICADA

(Especialização em Geologia de Engenharia)

2014

Resumo

O tema da presente dissertação de mestrado surge a jusante da tese de doutoramento intitulada “Estudo de caracterização de áreas mineiras degradadas, proposta de metodologia com aplicação à área mineira de Santo António, Penedono” desenvolvida pela Dr.^a Magda Roque em 2009.

Este tema surgiu da consciencialização sobre a necessidade de intervencionar e reabilitar as áreas mineiras degradadas (AMD), face ao elevado número de ocorrências em Portugal e grande perigosidade geotécnica e ambiental que representam.

A área de estudo, mina de Santo António, foi classificada com grau de perigosidade máximo – grau 4 (IGM, 2000, segundo Roque, 2009), devido às situações de instabilidade geotécnica e aos impactes ambientais que a caracterizam. Estes aspetos ganham particular importância dado que a área é facilmente acessível, permitindo a circulação de pessoas e gado, para acederem aos terrenos agrícolas que a rodeiam. Contribuindo para a urgência em reabilitar esta área mineira existem, a jusante da mesma, captações de águas subterrâneas (contaminadas) usadas para fins domésticos e agrícolas.

Do ponto de vista geotécnico, salientam-se as duas principais unidades de acumulação de resíduos minérios (escombreyras), designados no presente trabalho por ES1 e ES2, com dispersão de material no sopé e sinais de ravinamentos de grande escala e, ainda, a inexistência de estruturas de contenção eficientes para estes materiais de grande volumetria.

Evidencia-se, também, a presença de uma corta com grandes indícios de instabilidade, nomeadamente queda de blocos de dimensão métrica e descompressão do maciço.

A presente dissertação visa contribuir para a diminuição do perigo geotécnico que esta área mineira apresenta.

Face a este objetivo o plano de trabalhos integra a análise de estabilidade dos dois depósitos de resíduos ES1 e ES2, na sua situação atual e a modelação de um cenário de reperfilamento, com vista à melhoria das condições de estabilidade dos dois depósitos de resíduos, recorrendo ao *softwares Slope/W e Seep/W da GeoStudio*,

O plano de trabalhos integra também a análise cinemática dos taludes rochosos da corta, recorrendo a um *software Dips© da Rockscience*. Para o caso da corta, apontam-se algumas medidas corretivas dos taludes que contribuiriam para melhoraria significativa das respetivas condições de segurança e estabilidade geotécnica.

Palavras-Chave

Depósitos de resíduos; Análise de estabilidade; Corta; Análise cinemática; Movimentos de massa; Diminuição do perigo geotécnico de uma AMD

Abstract

The matter of this dissertation was developed simultaneously with the PhD thesis “Estudo de caracterização de áreas mineiras degradadas, proposta de metodologia com aplicação à área mineira de Santo António, Penedono”, by Dr.^a Magda Roque.

This dissertation concerns about characterization of degraded mining areas (DMA). This subject is relevant since mining areas represent a significant area of Portugal with considerable danger, both geotechnical and environmental.

Santo António mine is the case study for this dissertation, which has been considered level 4 in the dangerous scale (maximum degree in, IGM, 2000, according to Roque, 2009) due to geotechnical instability and environmental impact. This situation gain further importance because the area isn't isolated, it's an important access point for people who have adjacent farms and whereas contaminated water has been used over the past years to agricultural and domestic purposes.

From a geotechnical point of view there are two tailing heaps (ES1 and ES2) with visible signs of water erosions and material accumulated on the bottom. There are no efficient retention structures for large volumetric scale materials.

There also exist a query showing evidences of rock slopes instability, such as rock falls of metric size blocks and signs of rocks mass decompression, which assume great importance in this case study.

This dissertation focuses on reducing the geotechnical danger of this mining area.

To be able to fulfill this objective, the working plan integrates the stability analyses for both tailing heaps ES1 and ES2, taking in account its actual situation and a further rehabilitation solution, namely slopes profiling, in order to improve stability of both tailing heaps, resorting software Slope/W and Seep/W from GeoStudio.

Kinetic analyses of slopes of the query is also part of the working plan, which was simulated using software *Dips*© form *Rockscience*. Regarding the query, some corrective measures which contributed to a substantial improvement of the respective safety conditions and geotechnical stability are defined under the scope pf this dissertation.

Key-Words

Tailing heaps; Stability analyses; Query; Kinetic analyses; Slide slope; Reducing geotechnical danger of DMA

Agradecimentos

A concretização da presente dissertação de doutoramento não seria possível sem a colaboração de diferentes instituições e pessoas individuais, que de diversas formas contribuíram para a progressão e para a conclusão do trabalho.

Assim, de uma forma muito especial expresso os meus sinceros agradecimentos:

À Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), designadamente ao Departamento de Geologia e ao Centro de Geologia, por terem aceite o tema da dissertação e por ter proporcionado meios técnicos para a realização das diversas fases de trabalho.

Ao Município de Campo Maior e a todos os seus colaboradores, pelo apoio e incentivo e pelas facilidades proporcionadas na fase final da dissertação.

À Doutora Magda Roque, pela orientação técnica e científica, pela revisão da dissertação e, sobretudo, pelo apoio, incentivo, permanente disponibilidade e constante boa disposição, sem a qual não seria possível a sua concretização. É em grande consideração que lhe agradeço por tudo!

Ao Doutor Fernando Marques, pelos conhecimentos transmitidos e alguma bibliografia, pela revisão da dissertação e, sobretudo, pelo apoio, incentivo, permanente disponibilidade, por vezes mesmo sem a ter, e constante boa disposição, mais uma vez sem o qual não seria possível a sua concretização. É com grande admiração que lhe agradeço por tudo!

Aos meus pais. Obrigada pelo apoio incondicional e encorajamento, por serem os meus guias e por terem sempre acreditado!

À minha irmã por todo o apoio e carinho transmitido desde sempre!

Ao meu namorado, Tomás Murcela, por todo o apoio e carinho, por toda a paciência, pelos momentos de desabafo e palhaçada que bem precisei! Não esquecendo... Um obrigado à revisão da dissertação.

Ao meu amigo e colega de trabalho Ricardo Sá Rato, por toda a amizade, encorajamento, compreensão e pelos momentos de desabafo, loucura e diversão!

À minha amiga Sara Henriques, por toda a amizade, incentivo e em especial pelos momentos de “descanso cerebral”!

Aos meus amigos da capital Ana Sofia Raposo e Diogo Pereira, por toda a amizade, permanente disponibilidade, encorajamento e em especial pelos momentos na “casa do Diogo”!

Aos colegas de mestrado, especialmente ao Cesar Jesus, Luís Almeida e Mafalda Silva, pela ajuda, amizade e boa disposição demonstradas.

Aos colegas do Centro de Geologia, especialmente ao Luís Gouveia e Manuel Vasconcelos, pela ajuda e boa disposição demonstradas.

Por fim, a todos os que de alguma forma contribuíram positivamente para este trabalho e que aqui não foram referidos.

“Se a montanha vier na sua direção
e você não é Maomé, CORRA!!!!
Porque é um deslizamento!”

Fausto Guzzetti

RESUMO

ABSTRACT

AGRADECIMENTOS

ÍNDICE

Índice detalhado

Índice de Figuras

Índice de Quadros

Índice de Acrónimos

Índice de Símbolos

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos da dissertação	2
1.3. Estrutura da dissertação	2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Introdução	4
2.2. Classificação e Tipologia dos Movimentos de vertente	4
2.3. Fatores condicionantes e desencadeantes da instabilidade em taludes	11
2.4. Análise de estabilidade de taludes terrosos	15
2.4.1. Introdução	15
2.4.2. Determinação do Fator de Segurança	15
2.4.3. Método de Equilíbrio Limite	16
2.4.3.1. Introdução	16
2.4.3.2. Método de Morgenstern e Price	18
2.4.4. <i>Software Slope/W</i>	19

2.5. Análise cinemática de taludes rochosos	19
2.5.1. Introdução	19
2.5.2. Tipos de movimentos analisados na análise cinemática	20
2.5.3. <i>Software Dips</i> ©	22

3. ENQUADRAMENTO DO CASO DE ESTUDO

3.1. Enquadramento geral da área de estudo	25
3.1.1. Enquadramento Geográfico	25
3.1.2. Enquadramento Geomorfológico	26
3.1.3. Enquadramento Geológico	28
3.1.4. Enquadramento Tectónico	30
3.1.5. Enquadramento Hidrogeológico	31
3.1.6. Enquadramento Climatológico	32
3.2. Síntese dos problemas geotécnicos da área mineira de Santo António	32
3.3. Trabalhos de caracterização existentes	36
3.4. Caracterização dos materiais	37
3.4.1 Depósitos de Resíduos	38
3.4.2. Corta	40
3.5. Síntese das medidas de estabilidade preconizadas	42

4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS DEPÓSITOS DE RESÍDUOS MINEIROS

4.1. Introdução	43
4.2. Dados de base	43
4.3. Modelo Geológico-geotécnico	44
4.4. Localização dos perfis-críticos	46
4.5. Cálculo do Fator de Segurança para a situação atual	48
4.6. Discussão de resultados	58

4.7. Cálculo do Fator de Segurança para a situação de reperfilamento de taludes e discussão de resultados	61
---	----

5. ANÁLISE CINEMÁTICA DOS TALUDES DA CORTA

5.1. Introdução	69
5.2. Dados de base	69
5.3. Modelo Geológico-geotécnico	69
5.4. Localização dos taludes-críticos	71
5.5. Análise cinemática	72
5.6. Discussão de resultados	80
5.7. Medidas de estabilidade propostas para os diversos taludes-críticos da corta	81

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Índice Figuras

Figura 1 – Queda de blocos (Varnes, 1978)	7
Figura 2 – Tombamentos (Varnes, 1978)	7
Figura 3 - Deslizamento rotacional num maciço homogéneo (Varnes, 1978)	8
Figura 4 – Esquema dos vários tipos de escorregamentos rotacionais: a) Simples, b) Múltiplos e c) Sucessivos (adaptado de Hutchinson (1988) e de Claws e Comfort (1982), in Sousa 2013)	8
Figura 5 - Deslizamento translacional de detritos (Varnes, 1978)	9
Figura 6 - Deslizamento translacional de blocos (Varnes, 1978)	9
Figura 7 – Expansão lateral de detritos (Varnes, 1978)	10
Figura 8 – Fluxo de detritos (Varnes, 1978)	10
Figura 9 – Fluxo de terras (Varnes, 1978)	11
Figura 10 – Aplicação do método das fatias na massa de solo potencialmente instável, adaptado Marques, 2013	17
Figura 11 – Deslizamento em cunhar e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981)	21
Figura 12 – Deslizamento planar e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981)	21
Figura 13 – Tombamento e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981)	22
Figura 14 – Exemplo de projeção estereográfica para a ocorrência de tombamentos (software Dips© - Jesus et. al., 2013)	23
Figura 15 – Exemplo de projeção estereográfica para a ocorrência de deslizamentos planares (software Dips© - Jesus et. al., 2013)	23
Figura 16 – Exemplo de projeção estereográfica para a ocorrência de deslizamentos em cunha (software Dips© - Jesus et. al., 2013)	24
Figura. 17 – Localização geográfica da área mineira de Santo António no mapa de Portugal e na Carta Militar de Portugal (folhas 139 e 149 (SCE, 1998)) na escala 1:25 000	25
Figura 18 – Localização geográfica da área mineira de Santo António (41° 1'15.85"N 7°24'27.12"W) (GoogleEarth)	26
Figura 19 – Localização do perfil A-A' na Carta Militar de Portugal (folhas 139 e 149 (SCE, 1998)) na escala 1:25 000, segundo Roque, 2009	27

Figura 20 – Perfil topográfico A-A', com localização da área mineira de Santo António e da ribeira da Granja, segundo Roque, 2009	27
Figura 21 – Rede de drenagem da envolvente da área mineira de Santo António, segundo Roque, 2009	28
Figura 22 – Enquadramento geológico da área mineira de Santo António – Penedono, na folha 14-B da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50 000 (SGP, 1987)	29
Figura 23 – Localização aproximada de Penedono na bacia hidrográfica do rio Douro, adaptado de Roque, 2009	31
Figura 25 – ES1 – Pormenor dos materiais areno-siltosos com níveis, provavelmente, lenticulares de material argiloso, de cor negra a cinzenta escura	33
Figura 26 - ES1 – Pequeno muro de suporte ineficaz, ravinamento de grande escala com circulação de uma linha de água, dispersão de material no sopé antes do muro de suporte	33
Figura 27 – ES1 - Evidências de novos ravinamentos	34
Figura 28- ES2 - Ravinamentos de grande escala com circulação de uma linha de água, inexistência de estruturas de suporte	34
Figura. 29 - ES2 – Ravinamento de grande escala, dispersão do material no sopé, inexistência de estruturas de suporte	35
Figura 30 - Talude da corta muito instável, evidência de descompressão do maciço	36
Figura 31 - Queda de blocos métricos no sopé da corta	36
Figura. 32 – Diagrama de classificação textural das amostras (adaptado de Roque, 2009, Especificação LNEC E 219-1968)	38
Figura 33 – Curvas granulométricas das amostras de resíduos, adaptado de Roque, 2009	39
Figura 34 – Diagrama de densidade de fracturação da corta (projeção estereográfica - <i>software Dips</i> ©), adaptado de Roque, 2009	40
Figura. 35 – Roseta de fracturação da corta (projeção estereográfica - <i>software Dips</i> ©), adaptado de Roque, 2009	41
Figura 36 – Gráfico da variação do FS em função da coesão no perfil-crítico C da ES1	45
Figura 37 – Localização dos 4 perfis-críticos (designados A, B, C e D) definidos para ES1	47
Figura 38 – Localização dos 2 perfis-críticos (designados E e F) definidos para ES2	47
Figura 39 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico A da ES1 para a situação atual com NF na base da ES1	48

Figura 40 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico A da ES1 para a situação atual com NF no meio da ES1	49
Figura 41 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico A da ES1 para a situação atual com NF perto da superfície da ES1	49
Figura 42 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico B da ES1 para a situação atual com NF na base da ES1	50
Figura 43 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico B da ES1 para a situação atual com NF no meio da ES1	50
Figura 44 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico B da ES1 para a situação atual com NF perto da superfície da ES1	51
Figura 45 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico C da ES1 para a situação atual com NF na base da ES1	51
Figura 46 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico C da ES1 para a situação atual com NF no meio da ES1	52
Figura 47 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico C da ES1 para a situação atual com NF perto da superfície da ES1	52
Figura 48 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico D da ES1 para a situação atual com NF na base da ES1	53
Figura 49 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico D da ES1 para a situação atual com NF no meio da ES1	53
Figura 50 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico D da ES1 para a situação atual com NF perto da superfície da ES1	54
Figura 51 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico E da ES2 para a situação atual com NF na base da ES2	55
Figura 52 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico E da ES2 para a situação atual com NF no meio da ES2	55
Figura 53 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico E da ES2 para a situação atual com NF perto da superfície da ES2	56
Figura 54 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico F da ES2 para a situação atual com NF na base da ES2	56
Figura 55 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico F da ES2 para a situação atual com NF no meio da ES2	57

Figura 56 – Cálculo do Fator de Segurança do perfil-crítico F da ES2 para a situação atual com NF perto da superfície da ES2	57
Figura 57 – Cálculo do Fator de Segurança para o perfil-crítico C da ES1 com o NF na base da ES1 para a situação de reperfilamento do talude 1(V):2(H), apresentando a superfície de rotura com valor FS menor	62
Figura 58 – Cálculo do Fator de Segurança para o perfil-crítico C da ES1 com o NF na base da ES1 para a situação de reperfilamento do talude 1(V):2(H), apresentando a 1ª superfície de rotura generalizada	63
Figura 59 – Cálculo do Fator de Segurança para o perfil-crítico C da ES1 com o NF perto da superfície para a situação de reperfilamento do talude 1(V):2(H)	64
Figura 60 – Cálculo do Fator de Segurança para o perfil-crítico C da ES1 com o NF perto da superfície da ES1 para a situação de reperfilamento do talude 1(V):2(H), apresentando a 1ª superfície de rotura generalizada	65
Figura 61 – Cálculo do Fator de Segurança para o perfil-crítico E da ES2 com o NF na base da ES2 para a situação de reperfilamento do talude 1(V):2(H), apresentando a superfície de rotura com valor FS menor	66
Figura 62 – Cálculo do Fator de Segurança para o perfil-crítico E da ES2 com o NF na base da ES1 para a situação de reperfilamento do talude 1(V):2(H), apresentando a 1ª superfície de rotura generalizada	66
Figura 63 – Cálculo do Fator de Segurança para o perfil-crítico E da ES2 com o NF perto da superfície para a situação de reperfilamento do talude 1(V):2(H)	67
Figura 64 – Cálculo do Fator de Segurança para o perfil-crítico E da ES2 com o NF perto da superfície da ES2 para a situação de reperfilamento do talude 1(V):2(H), apresentando a 1ª superfície de rotura generalizada	68
Figura 65 – Diagrama de densidade de fracturação do talude da corta (projeção estereográfica - <i>software Dips</i> ©)	70
Figura. 66 – Roseta de fracturação do talude da corta (projeção estereográfica - <i>software Dips</i> ©)	70
Figura 67 – Localização dos 5 perfis-críticos definidos para a corta	72
Figura 68: Análise cinemática de tombamentos para o talude-crítico A (<i>software Dips</i> ©)	73
Figura 69: Análise cinemática de deslizamentos planares para o talude-crítico A (<i>software Dips</i> ©)	73

Figura 70: Análise cinemática de deslizamentos em cunha para o talude-crítico A (software Dips©)	74
Figura 71: Análise cinemática de tombamentos para o talude-crítico B (software Dips©)	74
Figura 72: Análise cinemática de deslizamentos planares para o talude-crítico B (software Dips©)	75
Figura 73: Análise cinemática de deslizamentos em cunha para o talude-crítico B (software Dips©)	75
Figura 74: Análise cinemática de tombamentos para o talude-crítico C (software Dips©)	76
Figura 75: Análise cinemática de deslizamentos planares para o talude-crítico C (software Dips©)	76
Figura 76: Análise cinemática de deslizamentos em cunha para o talude-crítico C (software Dips©)	77
Figura 77: Análise cinemática de tombamentos para o talude-crítico D (software Dips©)	77
Figura 78: Análise cinemática de deslizamentos planares para o talude-crítico D (software Dips©)	78
Figura 79: Análise cinemática de deslizamentos em cunha para o talude-crítico D (software Dips©)	78
Figura 80: Análise cinemática de tombamentos para o talude-crítico E (software Dips©)	79
Figura 81: Análise cinemática de deslizamentos planares para o talude-crítico E (software Dips©)	79
Figura 82: Análise cinemática de deslizamentos em cunha para o talude-crítico E (software Dips©)	80
Figura 83: Evidência de deslizamentos em cunha (circundadas a vermelho) no encontro entre os taludes-críticos C e D	81

Índice Quadros

Quadro I – Classificação dos movimentos de vertente, adaptado de Varnes (1978)	5
Quadro II – Escala de velocidades de deslocamento para os movimentos de vertente (adaptado de Varnes, 1978)	6
Quadro III – Variação da estabilidade relativa dos taludes, em função do FS, adaptado Abramson <i>et al.</i> , 2002	16
Quadro IV – Variação da estabilidade relativa dos taludes, em função do Fator de Segurança (FS), adaptado Abramson <i>et al.</i> , 2002	17
Quadro V – Distribuição estatística anual dos valores da precipitação na estação meteorológica de Penedono (http://snirh.pt)	32
Quadro VI – Composição granulométrica das amostras de resíduos, nas frações: cascalho, areia, silte e argila, adaptado de Roque, 2009	38
Quadro VII – Ensaio de Expansibilidade, Teor em água, Valor de Azul de Metileno, Superfície específica, grau de compactação, Ensaio triaxial, porosidade, índice de vazios e permeabilidade, adaptado de Roque, 2009	39
Quadro VIII - Atitude das quatro famílias de descontinuidades identificadas por Roque, 2009	41
Quadro IX – Esquema dos dados de base e ferramentas utilizadas na análise de estabilidade	44
Quadro X – Características geotécnicas dos materiais para a análise de estabilidade	46
Quadro XI – Características morfológicas dos perfis-críticos da ES1	58
Quadro XII - Resultados do fator de segurança para as diversas posições do nível freático e a estabilidade relativa do talude dos 4 perfis-críticos da ES1	58
Quadro XIII – Características morfológicas dos perfis-críticos da ES2	60
Quadro XIV - Resultados do fator de segurança para as diversas posições do nível freático e a estabilidade relativa do talude dos 2 perfis-críticos da ES2	61
Quadro XV – Esquema dos dados de base e ferramentas utilizadas na análise cinemática	69
Quadro XVI – Atitude das famílias identificadas na corta	71
Quadro XVII – Atitude e altura dos taludes-críticos da corta	72

Índice Acrónimos

AMD	Áreas Mineiras Degradadas
A-A'	Perfil topográfico com localização da área mineira de Santo António e da ribeira da Granja
A, B, C e D	Perfis-críticos da ES1
CXG	Complexo Xisto-Gauváquico das Beiras
ES1	Escombreira 1
ES2	Escombreira 2
E e F	Perfis-críticos da ES2
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
FS	Fator de Segurança
F1 e F2	Famílias de descontinuidades da corta
F3-2	Descontinuidades afastadas a muito afastadas
F4	Descontinuidades pouco afastadas
IGM	Instituto Geológico e Mineiro
IGME	<i>Instituto Geológico y Minero de España</i>
(H)	Horizontal
ISRM	<i>International Society Rocks Mass</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia
NF	Nível Freático
NP	Não Plástico
PDL	Penetração Dinâmica Ligeira
Ref.	Referência
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
SCE	Serviços Cartográficos do Exército
SGP	Serviços Geológicos de Portugal
SIMR	Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
X	Método que admite essa condição
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
(V)	Vertical
WP/WLI	<i>Working Party on World Landslide Inventory</i>

Índice Símbolos

m	Proporção de solo saturado ou, razão entre a espessura de solo potencialmente instável e a espessura de solo saturado
c'	Coesão em tensões efetivas
e	Índice de vazios
$f(x)$	Função específica do fator de segurança
ϕ'	Ângulo de atrito interno em tensões efetivas
λ	Escala do fator de segurança
γ_h	Massa específica aparente húmida
γ_d	Peso específico seco
$\gamma_{d\ max}$	Peso específico seco máximo
γ_{sat}	massa específica saturada (w=100%)
K	Permeabilidade
n	porosidade
N	Várias fatias do Método das Fatias
Q_{25}	Primeiro quantil (25% dos dados)
Q_{75}	Terceiro quantil (75% dos dados)
SE	Superfície específica
VBS	Valor de Azul de Metileno
w	Teor em água
w_L	Limite de Liquidez
w_P	Limite de Plastecidade
w_{op}	Teor de água ótimo

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

O tema da presente dissertação de mestrado surge a jusante da tese de doutoramento intitulada “Estudo de caracterização de áreas mineiras degradadas, proposta de metodologia com aplicação à área mineira de Santo António, Penedono” desenvolvida pela Dr.^a Magda Roque em 2009.

Este tema surgiu da consciencialização sobre a necessidade de intervencionar e reabilitar as áreas mineiras degradadas (AMD), já que representam fonte de significativo perigo geotécnico e ambiental.

Em Portugal, um país com longa tradição mineira, o IGM identificou, no início do século XXI, mais de 170 áreas mineiras a necessitar de reabilitação, por vezes urgente. Atualmente, já foram intervencionados diversos locais, existindo, contudo, urgência em intervir e reabilitar muitos outros, assim como a necessidade de investir nos estudos de caracterização direcionados à reabilitação das AMD.

Ao longo dos séculos, por falta de consciencialização sobre os impactes associados a uma indústria mineira desregulada em termos geotécnicos e ambientais, a atividade decorreu em função do melhor aproveitamento possível das jazidas, sem quaisquer preocupações de índole geotécnica e ambiental e, muitas vezes, de segurança desses locais. Quando estas acabam por ser abandonadas, deixando-se de revelar lucrativas, agravam estas problemáticas.

Dado o cenário da indústria mineira no início do século XXI, as diversas AMD existentes no país foram classificadas de acordo com o seu grau de perigosidade e foram definidas prioridades de intervenção.

A área de estudo, a mina de Santo António, foi considerada com grau de perigosidade máximo – grau 4 (IGM, 2000, segundo Roque, 2009), devido às situações de instabilidade geotécnica e aos impactes ambientais que a caracterizam. Estes aspetos ganham particular importância dado que a área é facilmente acessível, permitindo a circulação de pessoas e gado, para acederem aos terrenos agrícolas que a rodeiam. Contribuindo para a urgência em reabilitar esta área mineira existem, a jusante da mesma, captações de águas subterrâneas (contaminadas) usadas para fins domésticos e agrícolas.

Do ponto de vista geotécnico, salientam-se as duas principais unidades de acumulação de resíduos minérios (escombrelas), designados no presente trabalho por ES1 e ES2, com dispersão de material no sopé e sinais de ravinamentos de grande escala e, ainda, a inexistência de estruturas de contenção eficientes para estes materiais de grande volumetria.

Evidencia-se, também, a presença de uma corta com grandes indícios de instabilidade, nomeadamente queda de blocos de dimensão métrica e descompressão do maciço.

1.2. Objetivos da dissertação

A presente dissertação tem como principal objetivo contribuir para a diminuição significativa do perigo geotécnico da área mineira de Santo António.

Como já foi referido no subcapítulo anterior, na área mineira de estudo salientam-se duas principais unidades de acumulação de resíduos mineiros (ES1 e ES2) e a presença de uma corta com evidentes indícios de instabilidade.

Assim, com o intuito de diminuir o risco geotécnico de ambas as escombreyras, no presente plano de trabalhos foi incluído como objetivo a realização de uma análise de estabilidade da ES1 e ES2, recorrendo ao *software Slope/W* da *GeoStudio*, verificando quais as condicionantes da respetiva estabilidade. Após esta análise são identificadas as medidas de estabilização propostas para estas duas unidades de acumulação de resíduos e por último dimensionadas essas soluções, recorrendo mais uma vez ao *software Slope/W*.

Com o propósito de diminuir o perigo geotécnico da corta, no presente plano de trabalhos foi incluído como objetivo a realização de uma análise cinemática dos diversos taludes da corta, recorrendo ao *software Dips*© da *Rockscience*, verificando os movimentos de rotura a que estes estão sujeitos. Após esta análise são identificadas as medidas de estabilização propostas para estes.

Com este estudo, também se pretende contribuir para a otimização das soluções de reabilitação geotécnica em áreas mineiras degradadas, um tema cada vez mais urgente e atual.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada por sete capítulos principais.

No primeiro capítulo, Capítulo 1 - Considerações Iniciais, encontram-se 3 subcapítulos, onde relata uma breve introdução a esta dissertação, os seus principais objetivos e a sua estrutura.

O Capítulo 2 enquadra os fundamentos teóricos da dissertação onde é descrito o estado de arte. É feita, uma breve introdução da evolução do estudo de movimentos de vertente, a sua classificação e tipologia, os fatores condicionantes da sua estabilidade, a análise de estabilidade de taludes terrosos e a análise cinemática de taludes rochosos.

Encontra-se referenciado, no Capítulo 3, o enquadramento da área mineira de Santo António com identificação dos respetivos problemas geotécnicos

No Capítulo 4 realiza-se a análise de estabilidade dos perfis-críticos de cada depósito de resíduo mineiro.

No Capítulo 5, apresenta-se a análise cinemática dos taludes da corta.

No Capítulo 6 - Consideração Finais enunciam-se as principais conclusões e objetivos atingidos com a realização desta dissertação e ainda, algumas recomendações para um trabalho futuro.

Finalmente no Capítulo 7 são expostas as referências bibliográficas a que se recorreu, para fundamentação e orientação deste estudo.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS/ REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Introdução

Dos perigos geológicos existentes, os movimentos de vertente provocam danos superiores com elevados custos, assim como grande perda de vidas humanas, em comparação com outros perigos naturais, como sismos, erupções vulcânicas e cheias (Guzzetti, 2005).

O aumento da população mundial levou, nos últimos anos, à ampliação das atividades humanas sobre o meio natural em zonas potencialmente perigosas, resultantes de obras de grande e/ou pequena envergadura, como a construção de estradas, barragens, edifícios habitacionais entre outros, o que, consequentemente, conduziu ao notório aumento dos impactos em infraestruturas e perdas socioeconômicas (Guzzetti, 2005).

Com a intensificação das ações antrópicas o reconhecimento da importância do estudo dos movimentos de vertente acentuou-se. O progresso científico, a experiência que foi sendo adquirida e os dados catalogados permitiram um melhor conhecimento do comportamento mecânico dos materiais geológicos, possibilitando o desenvolvimento de novas metodologias de análise de estabilidade.

A evolução tecnológica contribuiu significativamente para melhorar a resolução deste tipo de problemas, pois permitiram o tratamento de um maior volume de informação em menos tempo e realizar operações de cálculo mais complexas, utilizando métodos de análise mais precisos.

2.2. Classificação e Tipologia dos Movimentos de Massa

Movimento de vertente (“*landslide*”) define-se como o movimento de uma massa de rocha, detritos ou terra ao longo de uma vertente, sob a influência da gravidade (Cruden, 1991). Com esta definição são excluídas as deslocamentos verticais por subsidência lenta e abatimentos, assim como avalanches de neve ou gelo e deslocamentos devidas à expansão e retração de solos argilosos (Pimenta, 2011).

A ocorrência de instabilidades está intimamente ligada a eventos extremos de atividade dos fatores ditos desencadeantes, como chuvas exceccionalmente intensas e/ou prolongadas, sismos, entre outros (Vasconcelos, 2011). Embora os movimentos que ocorrem,

frequentemente, associados a outro tipo de eventos, como por exemplo sismos, nem sempre aparecem nos registos como se tratando de movimentos de vertente (Sousa, 2013).

Com o objetivo de normalizar as terminologias e metodologias de avaliação e identificação de movimentos de vertente foi criado um grupo de trabalho composto por três sociedades geotécnicas internacionais e financiado pela UNESCO designado por *Working Party on World Landslide Inventory* (WP/WLI) (Pimenta 2011). Este grupo adotou a definição de movimentos de vertente referida anteriormente e, entre as várias classificações existentes para caracterizar os mecanismos de instabilidade de taludes, destacam a classificação definida por Varnes (1978). No Quadro I apresenta-se uma adaptação desta classificação, indicando-se os diferentes tipos de movimentos e os materiais a que geralmente estão associados.

Quadro I – Classificação dos movimentos de vertente, adaptado de Varnes (1978)

Tipo de Movimento		Tipo de Material		
		Rochoso	Solos Grosseiros	Solos Finos
Quedas		Queda de blocos	Queda de detritos	Queda de terras
Tombamentos		Tombamento de blocos	Tombamento de detritos	Tombamento de terras
Deslizamentos	Rotacionais	Deslizamento de blocos	Deslizamento de terras	
	Translacionais			
Expansões Laterais		Expansão de blocos	Expansão de detritos	Expansão de terras
Fluxos		Fluxo de blocos	Fluxo de detritos	Fluxo de terras
Complexos		Combinação de dois ou mais dos movimentos mencionados		

Não são incluídos os movimentos “*creep*”, que deverão apenas ser referidos como movimentos muito lentos, contrariamente à posição assumida por VARNES (1978), onde, apesar do “*creep*” ser considerado uma deformação simples que se mantém sob tensão constante, o autor inclui-o, por exemplo, nas escoadas em materiais do substrato e nas escoadas de detritos superficiais.

Os diferentes tipos de movimentos terrosos implicam diferenças substanciais em termos de velocidades de deslocamentos, fatores desencadeantes, profundidade máxima atingida pela superfície de rotura e áreas abrangidas (crista, volume do movimento e zona de acumulação junto ao sopé).

Varnes (1978) também definiu uma escala de velocidades para os diferentes tipos de movimentos, variando desde movimentos extremamente rápidos a movimentos extremamente lentos, como é possível verificar no Quadro II.

Quadro II – Escala de velocidades de deslocamento para os movimentos de vertente (adaptado de Varnes, 1978).

Descrição	Velocidade	Tipo de movimento
Extremamente rápidos	3 m.s ⁻¹	Quedas
Muito rápidos		
Rápidos	0,3 m.min ⁻¹	Deslizamentos
	1,5 m.dia ⁻¹	
Moderadamente rápidos	1,5 m.mês ⁻¹	
Lentos	1,5 m.ano. ⁻¹	
	60 mm.ano ⁻¹	
Muito lentos		
Extremamente lentos		Fluxos

Em seguida, procede-se a uma descrição sumária dos diferentes tipos de movimentos referidos no quadro I:

- **Queda de Blocos** - Corresponde à queda livre de blocos de rocha, de detritos ou solo, favorecida por superfícies de descontinuidade pré-existentes, ou em escarpas, falésias, ou vertentes muito inclinadas. Uma massa de qualquer tamanho, de solo e/ou rocha é destacada de um talude muito inclinado verificando-se que o deslocamento cisalhante ao longo da superfície de rotura é mínimo ou nulo, (Figura 1). O deslocamento ocorre principalmente por queda livre, por rolamento ou saltação do material, caracterizando-se estes movimentos por serem rápidos a extremamente rápidos. Este tipo de movimento ocorre frequentemente em formações de características resistentes bem diferenciadas, já que é fortemente condicionado pela gravidade, pela ação diferencial da erosão dos materiais do talude e pela presença de água intersticial (Varnes, 1978).

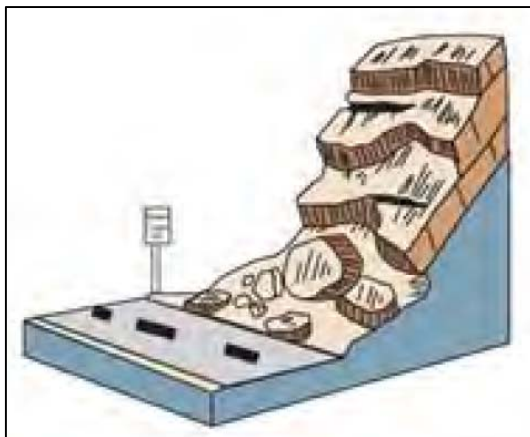


Figura 1 – Queda de blocos (Varnes, 1978)

- Tombamentos - Este movimento tem origem na ação de forças que impulsionam colunas ou painéis de rocha para o exterior do maciço (Figura 2). O destaque destas cunhas rochosas deve-se: à existência de descontinuidades que, ao favorecerem a infiltração de água para o interior do maciço, promovem o desenvolvimento de pressões hidrostáticas elevadas e à diferença entre as características de resistência do material que constitui a parte superior da escarpa e o terreno subjacente, induzindo esforços de tração na zona menos dúctil por cedência progressiva da base de apoio dos blocos. São movimentos extremamente lentos a extremamente rápidos, muitas vezes acelerando ao longo do deslocamento (Varnes, 1978).

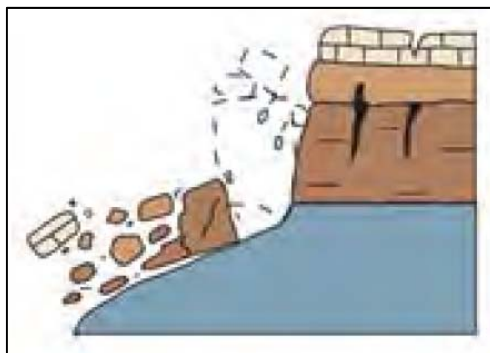


Figura 2 – Tombamentos (Varnes, 1978)

- Deslizamentos - Ocorrem quando existe um desequilíbrio na distribuição de forças ao longo de uma determinada superfície, que faz com que as forças atuantes, que favorecem o movimento, sejam superiores às forças resistentes. As primeiras evidências de movimento consistem no aparecimento de fendas na superfície topográfica original ao longo das quais a escarpa principal do deslizamento se formará. Este movimento atinge velocidades muito variadas, desde rápidos a lentos. De acordo com a geometria

da superfície a que dão origem, os escorregamentos podem ser classificados em rotacionais ou translacionais (Varnes, 1978).

- Deslizamentos rotacionais – Surgem frequentemente em solos homogêneos e caracterizam-se por ocorrerem ao longo de superfícies de deslizamento curvas em que a massa mobilizada sofre um movimento de rotação em torno de um eixo posicionado acima do seu centro de gravidade, como é possível observar na Figura 3. Estes movimentos são moderadamente rápidos a rápidos (Varnes, 1978). De acordo com Buma e Van Asch (1996, in Sousa, 2013 e Santos, 2008) os escorregamentos rotacionais podem ser divididos em três tipos: simples, múltiplos e sucessivos, como se mostra nos esquemas da Figura 4. Este tipo de movimento pode estar restrito a áreas de apenas alguns metros quadrados ou estender-se por vários hectares (Sousa, 2013). Neste tipo de movimento formam-se fendas de tração transversais no sopé podendo vir a originar fluxo de terras posteriormente (Vallejo *et al.*, 2002).

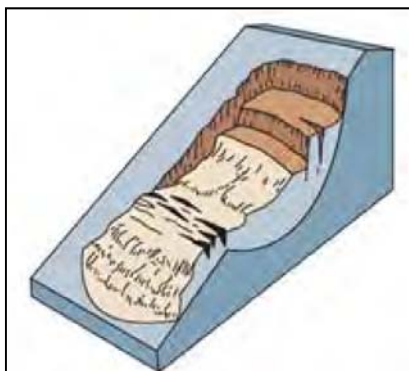


Figura 3 - Deslizamento rotacional num maciço homogêneo (Varnes, 1978)

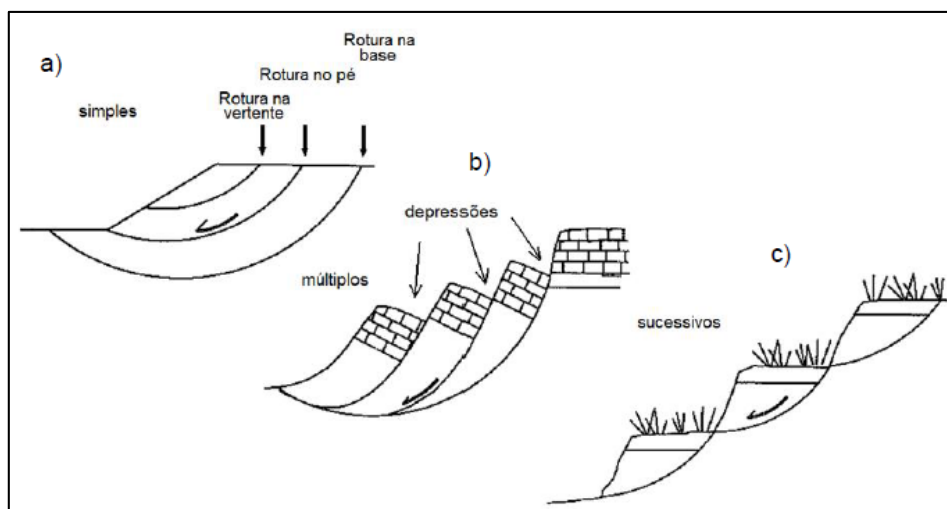


Figura 4 – Esquema dos vários tipos de escorregamentos rotacionais: a) Simples, b) Múltiplos e c) Sucessivos (adaptado de Hutchinson (1988) e de Claws e Comfort (1982), in Sousa 2013)

- Deslizamentos Translacionais - Neste tipo de escorregamentos, a ruptura ocorre segundo superfícies de fragilidade planas que coincidem com superfícies de estratificação de contacto entre diferentes tipos de materiais, ou de falhas. O movimento ocorre em solos (Figura 5) ou rochas (Figura 6) e trata-se de escorregamentos em que o material em movimento apresenta grande deformação, e abrange várias unidades semi-independentes, uma vez que a massa se rompe por cisalhamento e progride sobre uma superfície plana. Pode prolongar-se indefinidamente na superfície em que ocorre, desde que essa superfície esteja suficientemente inclinada e desde que a resistência ao corte ao longo da superfície permaneça inferior às forças instabilizadoras (Varnes, 1978).

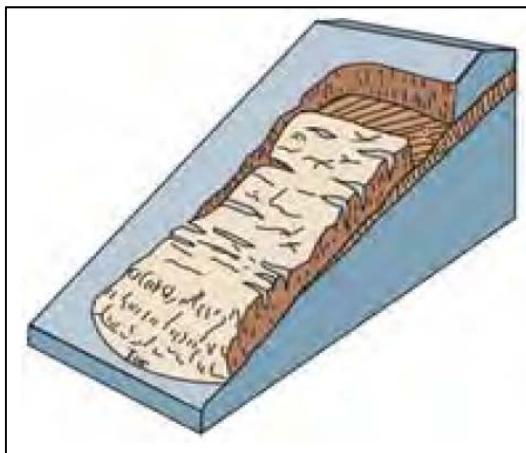


Figura 5 - Deslizamento translacional de detritos (Varnes, 1978)

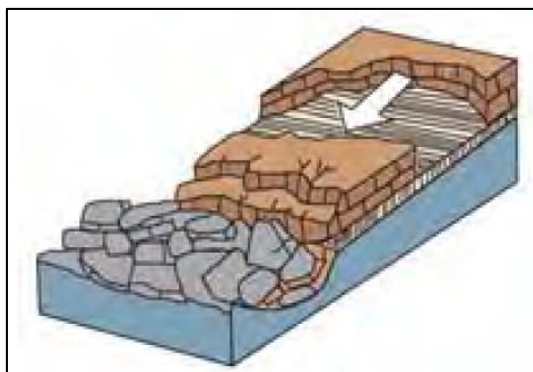


Figura 6 - Deslizamento translacional de blocos (Varnes, 1978)

- Expansões laterais – Sucedem através de extensões laterais, extremamente lentas, acomodadas por fracturas de cisalhamento ou tração. Este movimento desenvolve-se devido à existência de material subjacente de elevada plasticidade que possibilita a subsidência dos blocos superiores (Figura 7). Podem ser identificados dois tipos de expansões laterais: movimentos que resultam numa extensão generalizada sem que exista uma superfície de corte bem definida, nem uma zona de fluxo plástico, ocorrendo

predominantemente em locais onde aflora o substrato rochoso (*bedrock*), especialmente nas cristas dos cumes; e movimentos que envolvem a fracturação e extensão do material coerente, tanto em substratos rochosos como em solos onde podem resultar de movimentos como rotação e translação, mas também de liquefação, fluxo e extrusão de material mais brando. São movimentos complexos, mas bastante comuns em alguns contextos geológicos (Varnes, 1978).

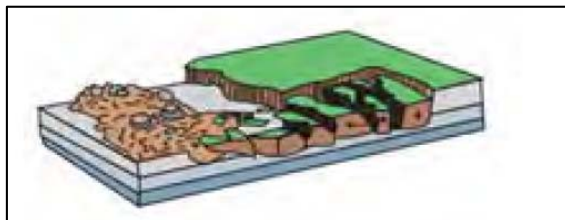


Figura 7 – Expansão lateral de detritos (Varnes, 1978)

- Fluxos - São movimentos geralmente muito rápidos, ao longo de uma vertente ou de uma escarpa, constituídos por misturas de solos com fragmentos de rocha. Geralmente têm origem na diminuição da resistência dos materiais que formam a capa do talude, podendo também ser desencadeados como consequência de abalos sísmicos, já que ocorrem em materiais não consolidados (Figura 8). Podendo ser rápidos ou lentos, em solos saturados ou não, são movimentos espacialmente contínuos, nos quais as superfícies de rotura têm uma dimensão curta, formando geralmente um canal de escoamento mais estreito e terminam a jusante por leques de acumulação. Os fluxos podem igualmente ocorrer quando os terrenos exibem elevada percentagem de água. Nestas condições o material comporta-se como um fluido, sofrendo deformação contínua sem apresentar superfícies de rotura definidas. Nestes casos, a água é o principal agente que controla o início do movimento, diminuindo a coesão dos solos, aumentando o grau de saturação e a perda de resistência dos materiais e a consequente fluidificação dos solos (Varnes, 1978) (Figura 9).

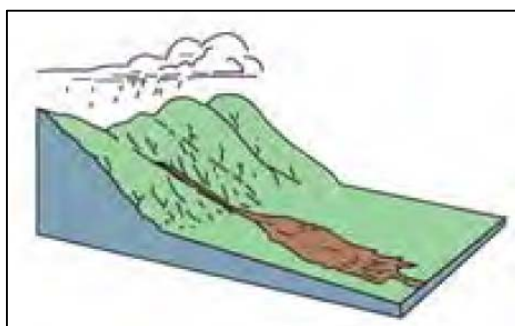


Figura 8 – Fluxo de detritos (Varnes, 1978)



Figura 9 – Fluxo de terras (Varnes, 1978)

2.3. Fatores condicionantes e desencadeantes da instabilidade em taludes

Segundo Varnes (1978) raramente a ocorrência de instabilidades tem origem num único fator, sendo resultado de múltiplos fatores, que vão tendo um efeito cumulativo ao longo do tempo.

Assim, destacam-se dois tipos de fatores que são avaliados num movimento de vertente, os fatores condicionantes e os desencadeantes. Estes, por sua vez, englobam diversos processos de natureza variada.

Os fatores condicionantes são intrínsecos às propriedades das vertentes:

- **Condições Geológicas** – As diferentes litologias têm propriedades geomecânicas distintas. Estas dependem das propriedades físicas dos materiais que as constituem, ou seja, dos parâmetros de resistência ao corte que cada litologia apresenta. No caso dos maciços terrosos, os seus parâmetros de resistência ao corte dependem da sua composição, granulometria, teor em água e permeabilidade. Enquanto nos maciços rochosos, para além da sua composição, teor em água, permeabilidade, os seus parâmetros de resistência ao corte dependem também, do seu grau de fracturação, das características das discontinuidades e do grau de alteração. Assim, as litologias com parâmetros de resistência ao corte inferiores são menos resistentes;
- **Condições Geomecânicas** – A resistência ao corte dos solos resulta de um conjunto de fatores, que incluem o modo como os grãos contactam entre si e a sua composição, o ângulo de atrito interno e a coesão. Estes, por sua vez, dependem do estado de tensão no maciço. O critério de rotura para solos mais aplicado é o de Mohr-Coulomb que estabelece uma relação entre as tensões normais e as tensões tangenciais e, segundo o

qual, a resistência ao corte oferecida por um solo ou rocha, ao longo de um determinado plano, pode ser obtida pela equação 1 (Vallejo *et al.*, 2002):

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (1)$$

em que: τ – tensão de corte ao longo de um plano; c' – coesão efetiva; σ' - tensão normal efetiva, que resulta da diferença entre a tensão normal atuante sobre o mesmo plano e a pressão intersticial; ϕ' – ângulo de atrito interno efetivo;

- Condições Hidráulicas – A posição do nível freático provoca uma elevada alteração na resistência ao corte dos materiais, sendo dependente da topografia da região e especialmente da permeabilidade dos maciços, que por sua vez, é influenciada pela litologia, pela estrutura, pelo grau de alteração e pelo grau de fracturação (Vallejo *et al.*, 2002);
- Condições Geomorfológicas - A morfologia das vertentes, e especialmente o seu declive, têm uma importância fundamental no condicionamento das instabilidades. Isto deve-se ao facto de, não só o ângulo de inclinação da vertente, por si só, causar instabilidade, mas também os processos que dele dependem, como a acumulação de água, tanto na zona saturada como não saturada, está sujeita à taxa de infiltração, à percolação na zona não saturada e à subida rápida do nível de água, e ainda, pela forte influência que exerce no clima de uma região condicionando, como tal, os processos de meteorização e erosão;
- Presença de Vegetação - A vegetação é um fator que afeta a estabilidade das vertentes, principalmente de duas formas: através da sua influência nas condições hidrológicas de um local e através do efeito mecânico das raízes. A presença de vegetação, para além de diminuir o impacto direto das chuvas no solo e determinar a quantidade de água que se infiltra e que permanece no solo, devido à evapotranspiração e absorção de água por parte das plantas, também contribui para uma maior contenção dos terrenos devido à capacidade de suporte das raízes, que não só aumentam a sua resistência ao corte, como tornam os solos menos vulneráveis à erosão. Por outro lado o peso da vegetação, em especial arbórea, pode influenciar negativamente na estabilidade das vertentes;
- Processos Físicos - Tal como já se referiu anteriormente, os materiais da superfície terrestre estão constantemente a ser atuados pelos agentes de meteorização, que são responsáveis pela sua degradação e desintegração. Estes processos traduzem-se no

transporte diferencial das partículas do solo, especialmente das mais finas, que tendem a acumular-se na base das vertentes e a constituir massas potencialmente instáveis. Por outro lado, acentuam o declive das vertentes permitindo o acesso da água ao interior dos maciços, contribuindo para a redução da sua resistência ao corte.

A variação de uma ou mais destas características, quer devida a causas naturais quer devida à atividade humana, resulta em alterações na resistência ao corte dos materiais, que podem vir a desencadear movimentos de vertente (IGME, 1986).

Normalmente, a ocorrência de instabilidades está associada a um evento desencadeante súbito, que provoca alterações rápidas na razão entre as forças resistentes e as forças instabilizadoras. É necessário considerar que esse facto corresponde a uma ação repentina sobre materiais que já sofreram um efeito cumulativo de pequenas alterações ao longo do tempo. Os fatores desencadeantes consistem em eventos que produzem estímulos externos ao maciço e que não estão diretamente relacionados com as propriedades intrínsecas do talude:

- Condições Climatológicas extremas - Uma das principais causas dos movimentos de vertente é a ocorrência de episódios de precipitação intensa, num curto espaço de tempo, ou de eventos de menor intensidade mas de longa duração. São vários os autores que referem a precipitação como um dos grandes fatores causadores de movimentos de vertente, como por exemplo Cruden & Varnes, 1996, Zêzere *et al.*, 1999, Marques *et al.*, 2008, entre outros. Segundo Terzaghi (1950), a presença de água nos maciços, especialmente ao nível das superfícies mais suscetíveis à rotura, leva a uma diminuição da coesão, devida ao aumento da pressão intersticial, tendo como consequência a redução da resistência ao corte e a instabilização dos terrenos. De acordo com Vallejo *et al.* (2002) é possível correlacionar o tipo de movimento com a duração e intensidade da precipitação. Normalmente, os movimentos superficiais ocorrem associados a precipitações muito intensas e de curta duração, ao passo que os movimentos mais profundos são desencadeados por eventos de menor intensidade mas de duração prolongada (Zêzere e Rodrigues, 1999). Assim, o estudo do comportamento dos materiais quando sujeitos a precipitações intensas ou prolongadas, é de enorme relevância para qualquer análise de estabilidade e tentativa de determinar a possibilidade de se virem a desencadear movimentos num determinado local. No entanto, correlacionar os eventos de precipitação com a ocorrência de instabilidades é um processo complexo devido à enorme diversidade de fatores que estão envolvidos;
- Alterações do nível de água – Eventos de precipitação extrema podem causar uma subida súbita do nível da água e, consequentemente, aumentar a instabilidade das

vertentes, mas existem outros fenómenos que também o podem fazer. Em zonas costeiras e em margens de rios ou lagos, após sobrelevações do nível do mar, inundações e temporais marítimos verifica-se um desses fenómenos, uma descida súbita do nível da água (*Vallejo et al.*, 2002). Os solos mais desfavoráveis a estas condições são os que têm baixa permeabilidade (e.g. argilosos e/ou siltosos), pois não permitem uma dissipação rápida da água intersticial. Quando essa água não é libertada, após uma descida súbita do seu nível, tendem a desenvolver-se pressões elevadas nos terrenos e a verificarem-se perdas de resistência nos materiais. Geram-se, deste modo, condições instáveis que contribuem para o desequilíbrio das encostas;

- Sismos - A ocorrência de sismos leva, frequentemente, ao desencadear de movimentos de massa, dependendo das características do próprio sismo (magnitude e distância ao epicentro) e do tipo de materiais existentes nas zonas afetadas (*Vallejo et al.*, 2002). A estes fatores podem, ainda, ser acrescentados os efeitos de sítio, que são condicionados pela perigosidade sísmica regional e pelas condições geológicas locais, e a direção das ondas sísmicas, que podem contribuir significativamente para uma maior intensidade da vibração dos terrenos. Quando ocorre um sismo geram-se ondas vibratórias com diferentes frequências que afetam os materiais à sua passagem, provocando alterações no seu estado de tensão, podendo levar a uma diminuição da coesão e, consequentemente, a uma perda da estabilidade (IGME, 1986). Os movimentos de vertente, despoletados pela ação sísmica, podem abranger áreas bastante extensas e englobar zonas, por vezes, densamente habitadas. Frequentemente, os danos causados por estes são erradamente atribuídos ao sismo que os despoletou, uma vez que é difícil fazer uma avaliação de qual destes processos deu origem às perdas verificadas, visto que ambos podem ocorrer quase em simultâneo;
- Ações Atrópicas - De acordo com Terzaghi (1950), as causas dos movimentos de vertente podem ser internas, levando a uma redução da resistência ao corte, ou externas, provocando um aumento na tensão de corte. As primeiras estão relacionadas com os fenómenos descritos anteriormente associados aos processos intrínsecos ao maciço, enquanto as segundas se relacionam com alterações na geometria da vertente, descompressão na base, sobrecarga na crista da vertente, imposição de vibrações no terreno ou alterações do regime de circulação de água. Geralmente, as alterações na geometria da vertente, descompressão na base, sobrecarga na crista da vertente, são atividades realizadas pelo Homem, para a construção de obras de pequena e grande envergadura, pelo que as atividades humanas também são responsáveis pela ocorrência de muitos movimentos em vertentes.

2.4. Análise de estabilidade de taludes terrosos

2.4.1. Introdução

A análise de estabilidade envolve um conjunto de procedimentos visando a determinação de um índice que permita quantificar o quão próximo da rotura um determinado talude se encontra, para determinados fatores condicionantes e desencadeantes.

Existem vários métodos para determinar este índice, analíticos, experimentais e observacionais. Esta tese debruça-se sobre um método analítico, que se baseia na teoria do equilíbrio limite.

A análise de estabilidade por equilíbrio limite tem uma grande aceitação, que se deve basicamente a três motivos segundo Thomaz (1984, in Pereira 2013): a simplicidade do método, ao nível satisfatório de acurácia dos seus resultados (no que diz respeito à segurança do maciço) e à relativa facilidade e baixo custo para se estimar ou obter os parâmetros de resistência do talude terroso com a precisão necessária para o bom funcionamento do método.

2.4.2. Determinação do Fator de Segurança

Os princípios físicos, ou fatores, que condicionam a estabilidade relacionam-se diretamente com as características geotécnicas e geomorfológicas da vertente. Assim, a estabilidade de uma vertente pode ser calculada por modelos que relacionam parâmetros como a sua topografia, o ângulo de atrito interno, a coesão, peso específico do material, posição do nível piezométrico, espessura de solo total e saturado, etc.

Na construção deste modelo e combinando estes parâmetros é obtido um valor de Fator de Segurança (FS) que resulta do quociente entre as forças resistentes e as forças instabilizadoras, de corte ou de cisalhamento, equação 2 (Marques, 2013).

$$FS = \frac{\text{Forças Resistentes}}{\text{Forças Instabilizadoras}} \quad (2)$$

Quando estamos a analisar roturas circulares, ou outras geometrias, no lugar de forças, temos momentos, então apresenta-se a equação 3:

$$FS = \frac{\text{Momentos Resistentes}}{\text{Momentos Instabilizadoras}} \quad (3)$$

Assim, valores de FS superiores a 1,0 indicam que a vertente se encontra estável, ainda que marginalmente, e por outro lado, valores inferiores a 1,0 irão indicar rotura na vertente em causa (Quadro III). Portanto, quanto maior for o valor obtido para o FS mais estável se encontra o talude.

Quadro III – Variação da estabilidade relativa dos taludes, em função do FS, adaptado Abramson *et al.*, 2002

Fator de Segurança (FS)	Estabilidade Relativa
$FS \leq 1$	Instável (rotura certa)
$1 < FS < 1.25$	Instável (rotura provável)
$1.25 < FS < 1.5$	Marginalmente instável
$FS > 1.5$	Estável

2.4.3. Método de Equilíbrio Limite

2.4.3.1. Introdução

A determinação da estabilidade de uma vertente ou talude pode ser realizada recorrendo a métodos de equilíbrio limite ou a métodos de elementos finitos.

Esta dissertação recorre a um método determinístico, mais concretamente ao método de Equilíbrio Limite, para a análise de estabilidade das escombreyras pela determinação de FS. Este método é amplamente utilizado graças à sua simplicidade e à elevada experiência acumulada ao longo dos anos. (Gerscovich, 2009 in Pereira, 2013)

O método Equilíbrio Limite rege-se pelas leis da estática para determinar o estado de equilíbrio de uma massa de terreno potencialmente instável, admitindo as forças que atuam sobre um ou vários pontos da superfície de deslizamento (superfície plana, circular, mista, etc.), não considerando os fenómenos como a rotura progressiva, nem as deformações e tensões sofridas pelo terreno (Marques, 2013). Assume-se ainda que a rotura é simultânea ao longo de toda a superfície de corte, o que pode não acontecer na realidade. Segundo Fellenius, 1936, evidências relatadas sugerem que a superfície de rotura é geralmente circular, especialmente em massas de solos homogêneos e isotrópicos, como é o caso de estudo abordado nesta dissertação.

Resumidamente, este método determina, ao longo de um potencial de rotura do talude, se a resistência ao corte do solo é ou não superior à que é necessária para mobilizar ou não o talude em equilíbrio. (Gerscovich, 2009, in Pereira, 2013). A resistência ao corte dos solos respeita a equação de Mohr-Coulomb.

Existem variadas análises que se regem pelo método do equilíbrio limite. Esta dissertação apela o método das fatias, que admite a massa de solos potencialmente instável dividida em n fatias, assumindo-se que, na base de cada uma, as tensões normais e de corte, bem como a resistência mobilizada, são constantes. Posteriormente aplica as equações de equilíbrio limite para cada fatia isoladamente. Como é possível observar na Figura 10, ao definir cada fatia deve atender-se a (Marques, 2013):

- Limites entre solos diferentes à superfície ou na superfície de rotura e intersecções com o nível freático;
- Variações de declive da superfície topográfica;
- As fatias devem ser mais estreitas nas zonas de maior declive da superfície de rotura.

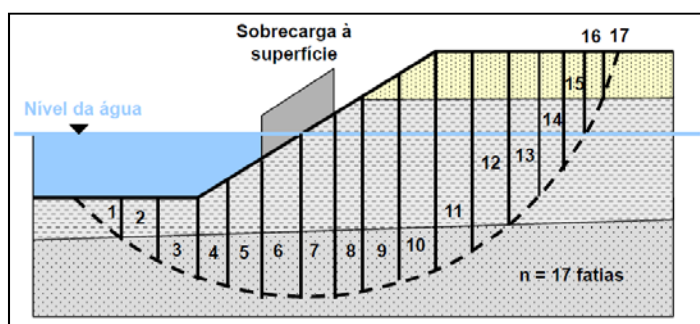


Figura 10 – Aplicação do método das fatias na massa de solo potencialmente instável, adaptado Marques, 2013

Existem vários métodos que se regem pela teoria do método do Equilíbrio limite e pelo método das fatias. No Quadro IV é possível analisar cada um desses métodos resumidamente. Entre eles podem-se citar, Fellenius (1927), Bishop e Bishop Simplificado (1955), Lowe & Karafiath (1960), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967), Corps of Engineers (1970) Jambu e Jambu simplificado (1973), Sarna (1973).

Quadro IV – Variação da estabilidade relativa dos taludes, em função do Fator de Segurança (FS), adaptado Abramson *et al.*, 2002

Método	Equilíbrio de Forças		Equilíbrio de Momentos
	x	y	
Fellenius			X
Bishop	X	X	X
Bishop Simplificado	X		X
Lowe & Karafiath	X	X	
Morgenstern e Price	X	X	X

Spencer	X	X	X
Corps of Engineers	X	X	
Jambu	X	X	
Jambu simplificado	X	X	
Sarna	X	X	X

Nota 1: X significa que o método admite essa condição

De acordo com GeoSlope (2012), entre estes métodos, os mais rigorosos são Spencer e Morgenstern e Price, os quais incluem todas as forças entre fatias e satisfazem todas as equações de equilíbrio estático.

2.4.3.2. Método de Morgenstern e Price

Neste trabalho, para a análise de estabilidade dos depósitos de resíduos mineiros, emprega-se o método de Morgenstern e Price, já que este satisfaz completamente as condições de equilíbrio e é de todos o que envolve a menor dificuldade numérica (Freitas, 2011).

A teoria básica deste método fundamenta-se na razão entre as componentes normal e tangencial das forças de interação entre as n fatias e é representado pelo produto de uma função específica por um fator de escala λ . (Freitas, 2011).

Com base nas condições de equilíbrio de forças verticais para fatias individuais e nas condições de equilíbrio de momentos para toda a massa, aparecem duas equações de equilíbrio com duas incógnitas, o fator de segurança (FS) e o fator de escala (λ), tornando então o problema determinado. No entanto, resolver o FS e o λ é muitas vezes complexo, pois as equações de equilíbrio são não lineares. Quando se realizam análises de estabilidade de taludes com os procedimentos estabelecidos, os cálculos são muitas vezes morosos, resultando em tempos de computação excessivamente longos. A situação requer portanto um algoritmo eficiente para computação dos valores de FS e de λ associados ao método em questão. (Freitas, 2011).

Assim, as duas equações de equilíbrio utilizadas no método são redirecionadas para obter duas equações para o fator de segurança (FS) e o fator de escala (λ). Tal ação permitirá formar um algoritmo mais conciso e compacto, facilmente implementável num programa de computador, resultando o problema em $4n$ variáveis. (Freitas, 2011).

Como o cálculo do FS resulta de um processo iterativo nunca conseguiremos definir a posição geométrica exata da superfície de rotura, assim estudam-se várias superfícies de rotura possíveis. (Freitas, 2011)

2.4.4. Software Slope/W

Com o objetivo de analisar a estabilidade das escombreyas ES1 e ES2, empregando o método de Morgenstern e Price, selecionou-se o programa *Slope* da *Geoslope*.

Este *software* é o mais usual para o estudo de estabilidade de taludes para projetos geotécnicos, civis e mineração, tipicamente, nas seguintes situações: vertentes terrosas (o que se adapta ao caso de estudo), taludes rochosos muito alterados, escavações inclinadas, estruturas de contenção ancoradas, bermas no sopé de uma encosta, suplementos no topo de uma encosta, estabilidade sísmica, fendas de tensão, submersão parcial e total, comportamento de solo não saturado (*Geoslope*, 2012).

O *Slope/W* calcula o fator de segurança dos taludes e analisa eficazmente os problemas simples e complexos para uma variedade de superfícies de deslizamento, condições de pressão intersticial e propriedades do solo, recorrendo a variados métodos de equilíbrio limite tendo sido selecionado para este trabalho o método de Morgenstern e Price (*Geoslope*, 2012).

2.5. Análise cinemática de taludes rochosos

2.5.1.Introdução

Os maciços rochosos, quando sofrem exploração mineira, estão sujeitos a processos altamente prejudiciais para a sua estabilidade. Os fortes impactos que toleram continuamente devido aos diferentes métodos de extração do mineiro leva a uma abertura das descontinuidades existentes e à formação de novas descontinuidades aumentando descompressão do maciço.

Segundo a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas - SIMR (ISRM, 1978) a compartimentação do maciço rochoso é caracterizada pelos seguintes parâmetros:

- Orientação (direção e inclinação);
- Espaçamento;
- Continuidade;
- Rugosidade;
- Resistência das Paredes;
- Abertura;
- Preenchimento;
- Fluxo de água nas fraturas;
- Número de famílias;

- Dimensão dos blocos;
- RQD – *Rock Quality Designation*

A análise cinemática tem como objetivo avaliar a possibilidade de ocorrência de diferentes modos de rotura de um talude (planar, em cunha e tombamento) de um determinado talude rochoso tendo em consideração a orientação das descontinuidades e a geometria do talude (Bieniawski, 1967).

O resultado da análise é representado graficamente através da utilização de uma rede de projecção estereográfica, onde se apresentam os polos e/ou os planos (vetores) dos taludes dos taludes em estudo e das descontinuidades do maciço (Fontinhas, 2012).

Para efeitos de interpretação dos resultados é utilizada, regularmente, uma rede de projecção de igual área (rede de *Schmidt*) representada no hemisfério inferior, aplicando-se a designada correção de Terzaghi, que tem em conta a possibilidade de repetição sistemática das famílias de fracturas na massa rochosa.

2.5.2. Tipos de movimentos analisados na análise cinemática

Os modos de rotura podem ser definidos como a descrição da geometria com que uma rotura ocorre. Os três modos de rotura que a análise cinemática tem em conta encontram-se de seguida descritos:

- Deslizamento de blocos em cunha – Origina-se através de dois planos de descontinuidades com direções divergentes que, ao se intersectarem, formam um bloco em forma de cunha. Para este tipo de rotura ocorrer, a linha de intersecção dos dois planos deve aflorar na superfície do talude com um ângulo de inclinação superior ao ângulo de atrito das descontinuidades (Hoek e Bray, 1981). É pois uma forma de rotura típica em maciços rochosos com várias famílias de descontinuidades, cujas orientações, espaçamentos e persistências vão determinar a forma e volume da cunha. A velocidade com que ocorrem estas roturas é normalmente rápida a extremamente rápida, podendo causar danos elevados, principalmente quando o bloco se desprende de alturas elevadas. Na figura 11 está representado um esquema de um deslocamento em cunha e a sua projecção estereográfica.

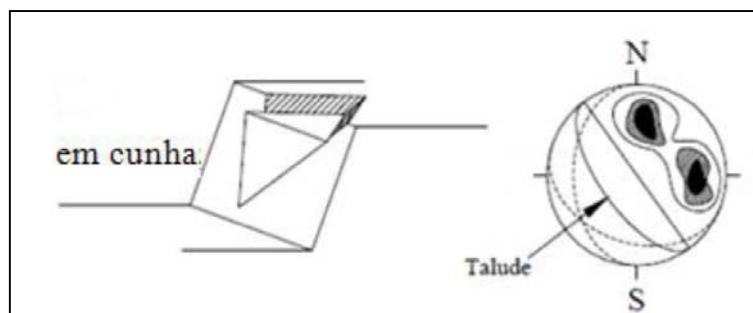


Figura 11 – Deslizamento em cunha e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981);

- Deslizamento de blocos planar - Envolve o deslocamento de massas rochosas ao longo de uma ou mais superfícies quase paralelas entre si e, segundo Hoek e Bray (1981), ocorre quando a direção do plano de deslizamento é aproximadamente paralela à face do talude, podendo ter uma diferença máxima de 20° , e o ângulo de inclinação da descontinuidade, ao longo do qual se dá a rotura, deve ser menor que o ângulo da face do talude, permitindo que o material acima daquela deslize por gravidade. Este tipo de rotura ocorre também por ação de forças como a pressão intersticial e acelerações sísmicas, sendo o volume de rocha deslocada ditado pela continuidade das descontinuidades. Estas, nos casos mais extremos, podem justificar a movimentação de milhares de metros cúbicos de rocha numa só rotura. Para existir rotura é necessário que um bloco distinto se destaque, tornando obrigatória a existência de descontinuidades laterais perpendiculares à face do talude para permitir assim a livre rotura do bloco. Hoek e Bray acrescentam que para que ocorra uma rotura planar em condições drenadas, o ângulo de inclinação do plano de deslizamento deve ser maior que o ângulo de atrito do mesmo plano. Este tipo de rotura é raro em taludes, porque só ocasionalmente se reúnem todas as condições geométricas requeridas para a produzir, pelo que muitas vezes é considerada como um caso especial de rotura por cunha. Na figura 12 está representado um esquema de um deslocamento plana e a sua projeção estereográfica.

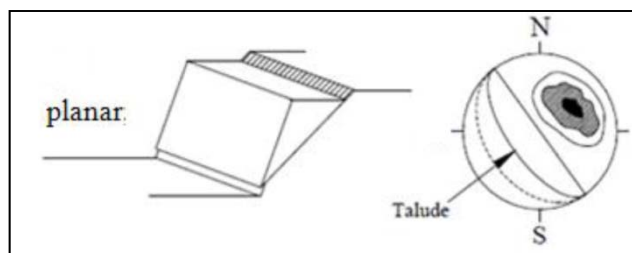


Figura 12 – Deslizamento planar e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981);

- Tombamentos – Como está referido no subcapítulo 2.2., estes movimentos resultam da rotação de colunas ou blocos de rocha sobre uma base fixa, tendo de existir uma família de descontinuidades paralela ou quase paralela à face do talude (desvio máximo de 30° entre ambas as direções, segundo Goodman, 1989, in Fontinhas, 2012), mergulhando com inclinação contrária à do mesmo, para que se dê o tombamento para diante da face do talude (Hoek e Bray, 1981.). O tombamento pode originar também deslizamentos, podendo algumas vezes existir uma inclinação progressiva do talude sem existir colapso (Varnes, 1978). O material rocha que se desprende do talude, desloca-se para a frente do mesmo, movimentando-se rapidamente pela face do talude, podendo fraturar-se, rolar e deslizar. Este movimento está relacionado com as ações da força gravítica, forças exercidas por blocos adjacentes, pela ação da coluna de água no interior das descontinuidades abertas ou pela atuação de forças tectónicas. Na figura 13 encontra-se representado um esquema de um tombamento e a sua projeção estereográfica.

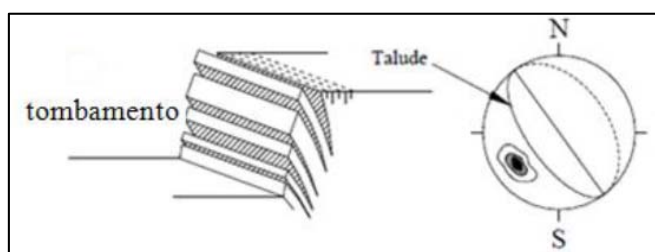


Figura 13 – Tombamento e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981)

2.5.3. Software Dips©

Com o objetivo de realizar uma análise cinemática nos taludes da corta da mina de Santo António recorreu-se ao *software Dips©* desenvolvido pela Rockscience (Dips, 2013).

Dips© permite realizar análises estatísticas de dados geológicos recolhidos no campo, nomeadamente, as orientações de superfícies de descontinuidades observadas *in situ* e em sondagens e de alguns elementos geológicos que possam induzir tensões no maciço, criando novas descontinuidades, como por exemplo, falhas, filões, etc.

Os parâmetros de resistência ao corte e deslizamento, tal como a orientação dos planos de descontinuidades, variam dentro de uma mesma família sendo necessário proceder a uma análise estatística das situações de instabilidade para a possibilidade de ocorrência de movimento ao longo dessa família. Na análise determinística o procedimento é mais simples e são determinados valores médios para a orientação e parâmetros de resistência de uma família de descontinuidades. (Dips, 2006)

Nas figuras 14, 15 e 16 são apresentados exemplos da análise cinemática de um maciço rochoso, para os diferentes tipos de movimento que se podem estudar no *software Dips*®, tombamentos, deslizamentos planares e deslizamentos em cunha (Dips, 2013).

Na Figura 14 caso se verificasse a existência de polos na zona assinalada a verde, existiria potencial para a ocorrência de movimentos de blocos correspondente a tombamento.

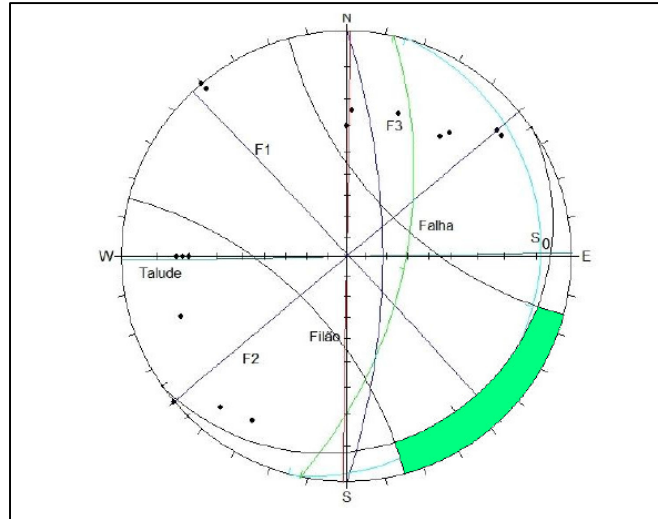


Figura 14 – Exemplo de projeção estereográfica para a ocorrência de tombamentos (*software Dips*® - Jesus *et. al.*, 2013)

Na Figura 15 caso se verificasse a existência de pólos na zona assinalada a verde, existiria potencial para a ocorrência de movimentos de blocos correspondentes a deslizamento planar.

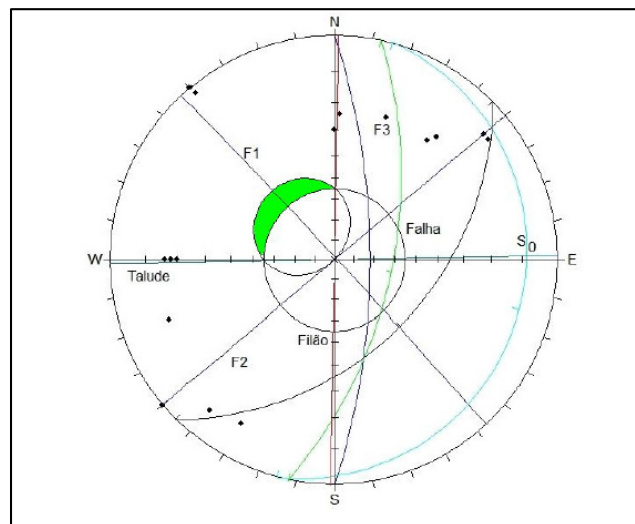


Figura 15 – Exemplo de projeção estereográfica para a ocorrência de deslizamentos planares (*software Dips*® - Jesus *et. al.*, 2013)

A Figura 16 caso existissem intersecções entre os vários planos médios das famílias de descontinuidades que se situassem dentro da zona assinalada a verde, a possibilidade de movimentos de blocos em cunha seria elevado.

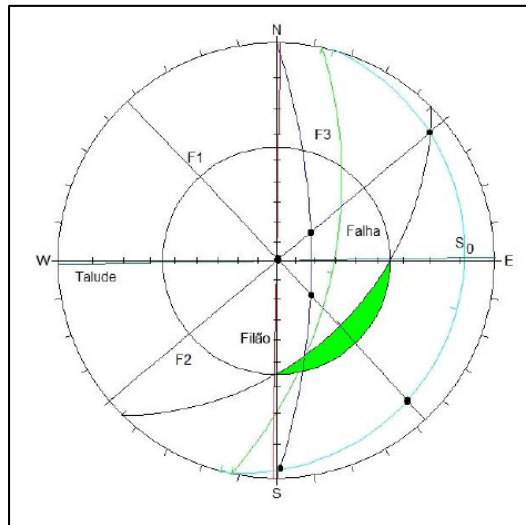


Figura 16 – Exemplo de projeção estereográfica para a ocorrência de deslizamentos em cunha (*software Dips© - Jesus et. al., 2013*)

3.ENQUADRAMENTO DO CASO DE ESTUDO

3.1. Enquadramento geral da área de estudo

3.1.1. Enquadramento Geográfico

A mina de Santo António, situada na encosta este da Serra da Laboreira, localiza-se na freguesia da Granja, concelho de Penedono, distrito de Viseu e dista cerca de 3 km para Noroeste da sede do concelho. A área encontra-se cartografada entre o extremo Norte da folha 149 (Penedono) e o extremo Sul da folha 139 (Paredes da Beira) da Carta Militar de Portugal à escala 1:25 000 dos Serviços Cartográficos do Exército (SCE) (SCE, 1998) com coordenadas $41^{\circ} 1'15.85''N$ $7^{\circ}24'27.12''W$ (Figuras 17 e 18).

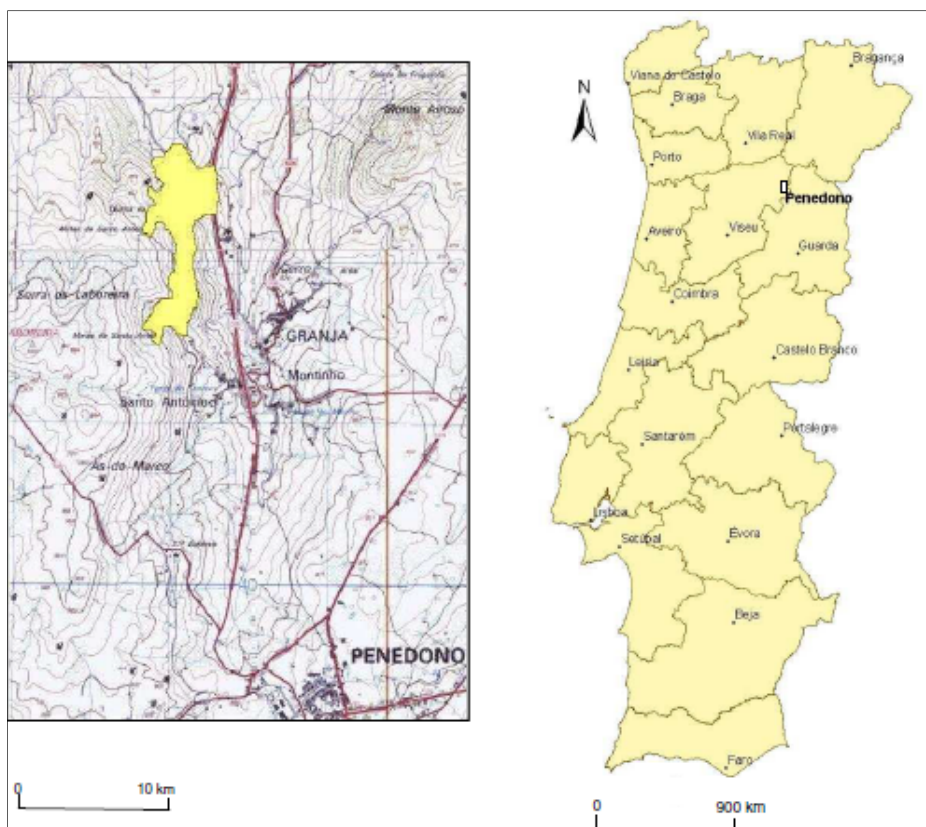


Figura. 17 – Localização geográfica da área mineira de Santo António no mapa de Portugal e na Carta Militar de Portugal (folhas 139 e 149 (SCE, 1998)) na escala 1:25 000

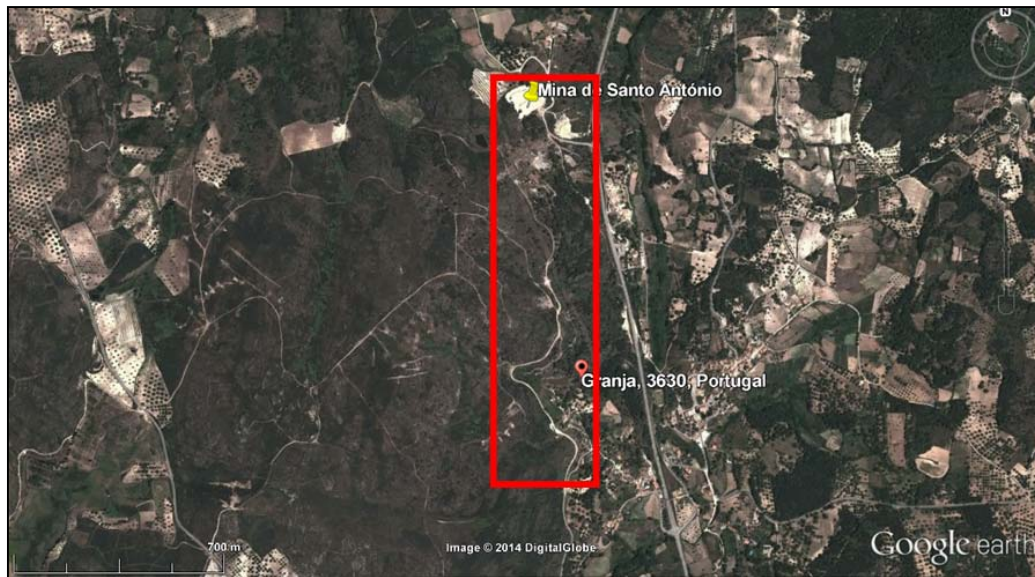


Figura 18 – Localização geográfica da área mineira de Santo António (41° 1'15.85"N 7°24'27.12"W) (GoogleEarth)

3.1.2. Enquadramento Geomorfológico

A área mineira de Santo António localiza-se na vertente Este da Serra da Laboreira, cujo ponto mais alto se encontra cartografado a uma cota de 1 000 m, no vértice geodésico da Laboreira. Esta Serra enquadra-se, em termos orográficos, no sistema montanhoso da região de Moimenta da Beira, cujos relevos mais elevados atingem os 1 000 metros de altitude (Ferreira & Sousa, 1994, *in* Roque, 2009). A vertente este da Serra apresenta um perfil côncavo, que se desenvolve desde a linha de encaixe da ribeira da Granja até ao ponto de cumeeada, tal como se pode constatar na planta da Figura 19 e no perfil topográfico A-A' apresentado na Figura 20.

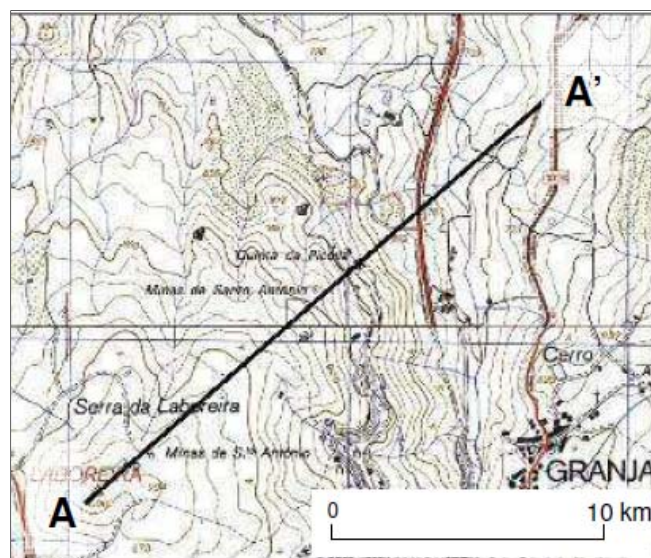


Figura 19 – Localização do perfil A-A' na Carta Militar de Portugal (folhas 139 e 149 (SCE, 1998)) na escala 1:25 000, segundo Roque, 2009

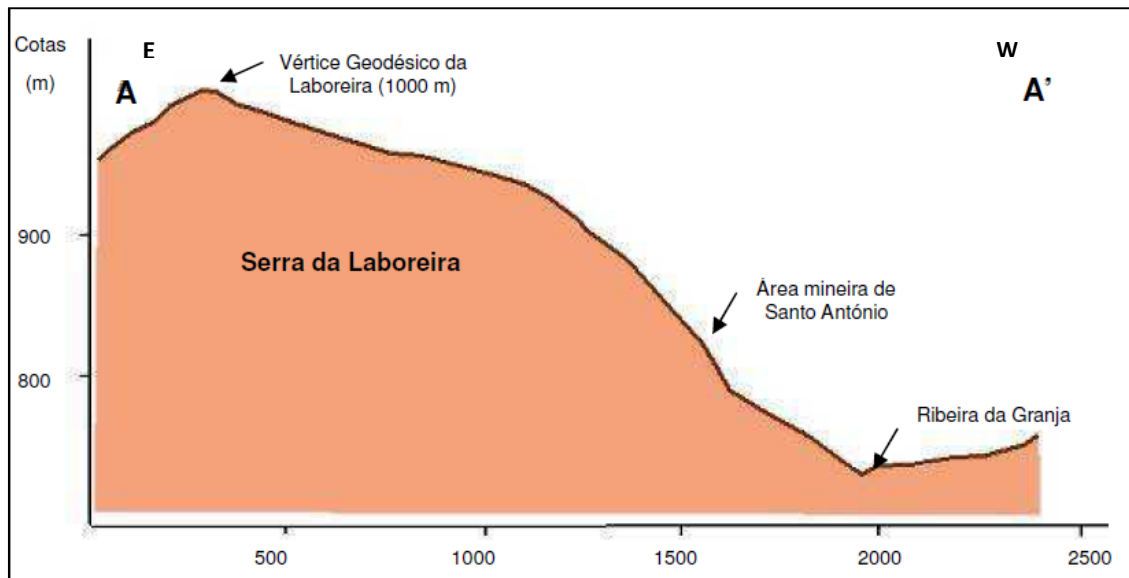


Figura 20 – Perfil topográfico A-A', com localização da área mineira de Santo António e da ribeira da Granja, segundo Roque, 2009

Na Figura 21 apresenta-se um esquema da rede de drenagem da envolvente à área mineira de Santo António, onde é de realçar a existência de uma linha de água entre a ES1 e ES2.

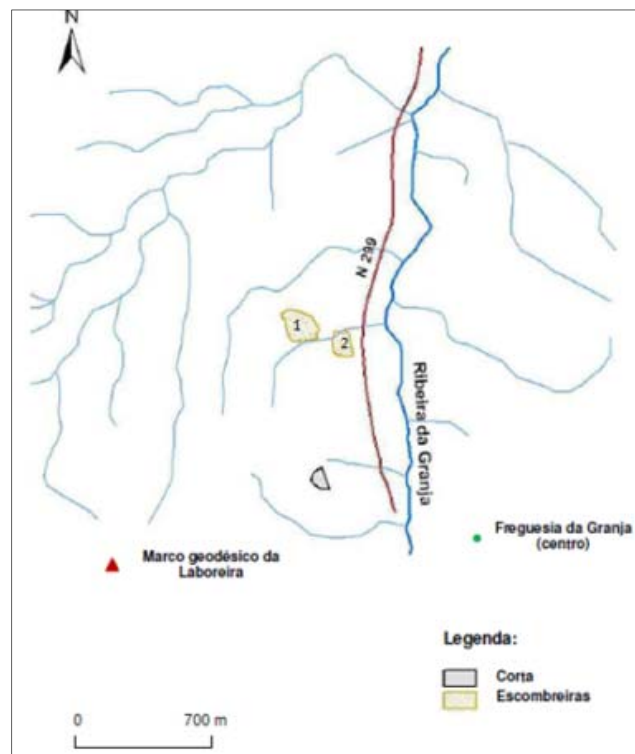


Figura 21 – Rede de drenagem da envolvente da área mineira de Santo António, segundo Roque, 2009

3.1.3 Enquadramento Geológico

A área mineira de Santo António encontra-se cartografada na folha 14-B (Moimenta da Beira) da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000 dos Serviços Geológicos de Portugal (SGP) (SGP, 1987), que abrange as folhas 149 (Penedono), 139 (Paredes da Beira), 138 (Armamar) e 148 (Moimenta da Beira) da Carta Militar de Portugal à escala 1:25 000 dos IGeoE.

Na região, são consideradas duas unidades litológicas fundamentais (Ferreira & Sousa, 1994): Metassedimentos câmbrios do Grupo do Douro, do Super-Grupo Dúrico-Beirão e Rochas granitóides de idade hercínica. Esta contacta, por falha, a Sudeste, com os xistos metamorfizados indiferenciados câmbrios do Grupo do Douro do Super-Grupo Dúrico-Beirão, designados, também, por Complexo Xisto-Grauváquico das Beiras (CXG) (Figura 22)

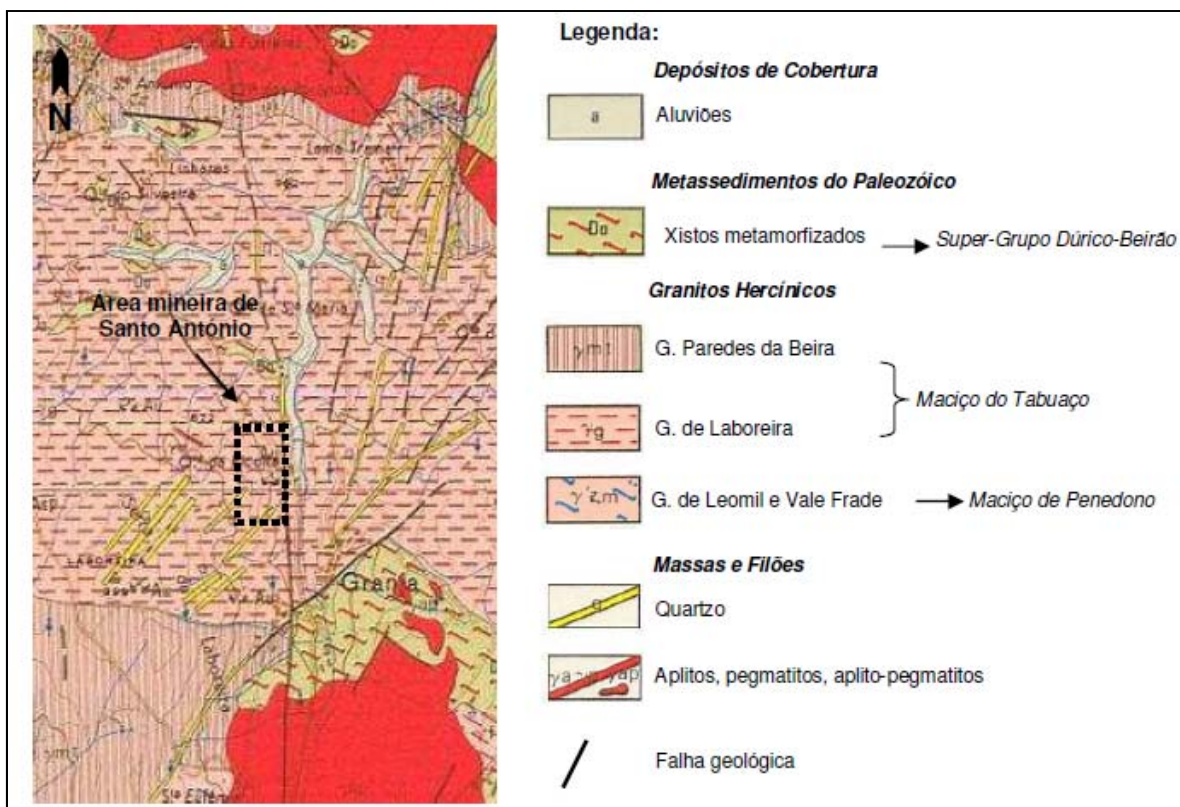


Figura 22 – Enquadramento geológico da área mineira de Santo António – Penedono, na folha 14-B da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50 000 (SGP, 1987)

As rochas graníticas expostas na zona da área mineira em estudo pertencem ao grupo de granitos orogénicos de duas micas, que fazem parte do grande Antiforma Lamego-Penedono-Escalhão de idade Hercínica (Sousa & Macedo, 1987 in Ferreira & Sousa, 1994). Nos granitos de duas minas é possível identificar duas associações de fácies distintas: maciço do Tabuaço e

maciço de Penedono. A área de estudo enquadra-se no maciço do Tabuaço que contacta a Norte, já na folha 10-D (Alijó), com formações do CXG, enquanto o seu bordo Sul é compartilhado por um alinhamento de painéis de metassedimentos do CXG e pelos maciços graníticos de Penedono e de Vale Frade. O maciço apresenta uma forma alongada, segundo uma direção NW-SE, em concordância com as estruturas hercínicas, assemelhando-se a um batólito instalado segundo o eixo de um anticlinal definido pelas formações do CXG. O contacto Norte é, geralmente, feito por pequenas falhas, que terão facilitado a sua instalação. O metamorfismo de contacto de baixo grau, induzido nas rochas encaixantes, aponta para que este maciço tenha ascendido a níveis crustais relativamente elevados (Ferreira & Sousa, 1994).

No maciço do Tabuaço são distinguíveis três fácies, que definem um zonamento concêntrico: a fácies de granito de Paredes da Beira-Tabuaço (zona externa), a de Sendim-Laboreira (zona intermédia) e a de granito de Aricera (zona interna). A fácies de granito de Sendim-Laboreira, aflorante na zona da área mineira de Santo António, é a que apresenta maior expressão no maciço do Tabuaço. Nesta fácies estão englobadas as manchas de Sendim e da Laboreira, muito semelhantes em termos de textura e de composição, diferindo apenas na granulometria, sendo os granitos da Laboreira os mais grosseiros. A composição mineralógica inclui quartzo contendo agulhas de silimanite, albite não zonada, moscovite, biotite, clorite (cloritização da Biotite) e turmalina. Como minerais acessórios são identificados a apatite, o zircão e raros opacos. Datações K-Ar efetuadas nas biotites e nas moscovites deste granito permitem atribuir-lhe uma idade de instalação de 305 Ma (Ferreira & Sousa, 1994). Para além dos granitos hercínicos e dos metassedimentos paleozóicos, distinguem-se nesta área algumas rochas filoneanas, que se apresentam, normalmente, a preencher as fracturas das rochas pré-existentes. As massas e filões existentes são, fundamentalmente, de três tipos: aplitos e/ou aplopegmatitos, filões básicos e filões de quartzo. Estas rochas ocorrem, predominantemente, no sector Este da folha 14-B, associando-se preferencialmente ao maciço do Tabuaço, e dispõem-se, de forma predominante, no bordo do maciço, sobretudo, junto ao contacto com os metassedimentos. Neste contexto, distinguem-se duas ocorrências características: as manchas aplopegmatíticas de Póvoa de Penela e de Penedono-Granja e os filões aplopegmatíticos com duas orientações preferenciais: NE-SW e NW-SE (Ferreira & Sousa, 1994).

As minas de Au de Penedono, que incluem a área mineira de Santo António, constituem o núcleo mineiro mais importante da região (Ferreira & Sousa, 1994).

3.1.4. Enquadramento Tectónico

Quanto à tectónica, os metassedimentos do Grupo do Douro exibem a atuação de duas fases de deformação hercínica (F1 e F3 Hercínica Ibérica), que se sobrepõem a uma fase

anterior ante-ordovícica (Ferreira & Sousa, 1994). A primeira fase de deformação (F1) traduz-se por grandes dobras, megascópicas e mesoscópicas, com eixo de orientação geral NW-SE e plano axial subvertical, às quais se associa uma clivagem xistenta de plano axial subvertical. Junto ao sector Noroeste, na proximidade com a bordadura granítica, essa clivagem tende sistematicamente para Norte e as dobras são de flanco inverso (Ferreira & Sousa, 1994). A terceira fase (F3) caracteriza-se por dobras mesoscópicas flexurais, assimétricas, com eixos subhorizontais, homoaxiais com F1, a que se associa uma clivagem de crenulação, nem sempre visível. A referida clivagem apresenta orientação NW-SE, inclinando, quase sempre, para Sul, com valores, geralmente, inferiores a 45°, evidenciando-se, sobretudo, no sector Nordeste. Esta fase é simultânea à instalação dos granitos e granodioritos sin-tectónicos (F3) (Ferreira & Sousa, 1994).

No que diz respeito à ocorrência de grandes fracturas, distinguem-se as seguintes situações (Ferreira & Sousa, 1994): Sistemas de falhas NW-SE (N60°W) subverticais, desenvolvidas, sobretudo, nos metassedimentos; Sistema de fracturas NE-SW (N20°-30°E) e suas conjugadas, que formam, em norma, grandes estruturas de falha que albergam, geralmente, grandes filões brechóides de quartzo; Fracturas N-S a N10°W; Zona de Cisalhamento E-W a WNW, com largura de cerca de 500 m, à qual se associam fendas de tração.

3.1.5. Enquadramento Hidrogeológico

Toda a área abrangida pela folha 14-B (Moimenta da Beira) faz parte da bacia hidrográfica do rio Douro (Figura 23). Os rios Varosa, Tedo, Távora e Torto são afluentes da margem esquerda do Rio Douro, que compartilham toda a área segundo um traçado NNW (Ferreira & Sousa, 1994).

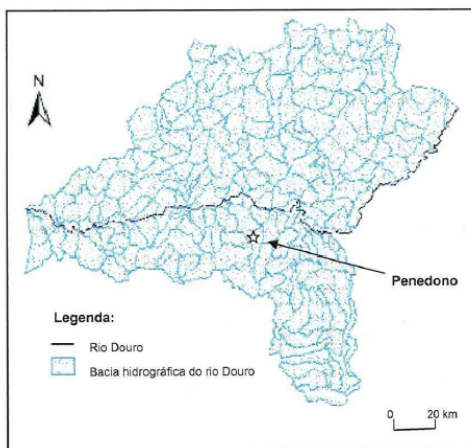


Figura 23 – Localização aproximada de Penedono na bacia hidrográfica do rio Douro, adaptado de Roque, 2009

A rede hidrográfica é condicionada a uma tectónica muito intensa, em blocos, estando o traçado dos rios condicionado a um sistema de faturação com direcções NNW-SSE, NNE-SSW e N-S. A direcção e o desenvolvimento dos cursos de água é bastante regular e a drenagem superficial está sempre condicionada ao relevo da região e à orientação da faturação (Ferreira & Sousa, 1994). Os principais cursos de água correm em traçado condicionado pela fracturação principal NNW-SSE, apresentando-se, no geral, bastante irregulares nos metassedimentos e de modo mais regular e retilíneo em zonas de granitóides (Ferreira & Sousa, 1994). Os vales originados pelos principais rios e seus afluentes são muito profundos e entalhados nas zonas xistentas do Grupo do Douro.

Quanto à aptidão aquífera das formações da área abrangida pela carta de Moimenta da Beira, o relevo é muito acentuado, com declives elevados que permitem a escorrência das águas, resultando, consequentemente, na presença de solos delgados e, por vezes, na sua total inexistência (Ferreira & Sousa, 1994). Os aquíferos existentes nesta área, são do tipo fissurado e a sua produtividade é, geralmente, baixa, com valores médios na ordem de 1 l.s^{-1} , registando-se valores mais baixos nos aquíferos mais superficiais. Os aquíferos são considerados muito vulneráveis à poluição, já que estão sujeitos a contaminação por águas agrícolas, domésticas e minérias, embora possuem um poder de filtração reduzido.

3.1.6. Enquadramento Climatológico

A distribuição da precipitação anual em Penedono tem um valor médio cerca de 700mm. No Quadro V, apresenta-se a distribuição estatística anual dos valores da precipitação registada na estação meteorológica de Penedono, entre os anos 1878 e 1994 (ano de encerramento).

Quadro V – Distribuição estatística anual dos valores da precipitação na estação meteorológica de Penedono (<http://snirh.pt>)

Estação	Mínimo (mm)	Q ₂₅ (mm)	Média (mm)	Mediana (mm)	Q ₇₅ (mm)	Máximo (mm)
Penedono	150,4	528,1	701,2	666,1	557,4	13373,5

Q₂₅ – Primeiro quantil (25% dos dados); Q₇₅ - Terceiro quantil (75% dos dados)

3.2. Síntese dos problemas geotécnicos da área mineira de Santo António

Os problemas geotécnicos presentes na área mineira de Santo António correspondem à presença de dois depósitos de resíduos principais, de dimensões consideráveis, sem cobertura superficial e com evidências de instabilização, (ES1 e ES2), nomeadamente sob a forma de dispersão de material no sopé e de ravinamentos de grande escala e de um talude da corta muito instável. Os depósitos de resíduos, para além de representarem instabilidade geotécnica, com necessidade de intervenção, afiguram-se uma das principais fontes de contaminação, com repercussões no meio envolvente. Estes depósitos, resultantes da deposição das polpas rejeitadas das células de flutuação, consideradas estéreis (relativamente ao minério), foram aumentando de volume durante os anos de laboração da mina, sem quaisquer cuidados de índole ambiental ou de segurança.

A ES1, com uma granulometria aparentemente mais grosseira que a ES2, corresponde ao depósito de maiores dimensões, com volume estimado de 60 000 m³. É visível neste depósito uma heterogeneidade vertical no que concerne às características dos materiais, expressa pela ocorrência de níveis areno-siltosos de cor amarelo claro e pouco coesos, intercalados com outros de maior coesão aparente. Salienta-se, ainda, a ocorrência de níveis, provavelmente, lenticulares, de espessura muito reduzida e expressão quase residual, de material argiloso, de cor negra a cinzenta escura (Figura 25). Embora este depósito apresente um pequeno muro de suporte, ele é claramente ineficaz devido à grande dimensão da ES1 (Figura 26). Na Figura 27 é possível observar a presença de evidências de novos ravinamentos.



Figura 25 – ES1 – Pormenor dos materiais areno-siltosos com níveis, provavelmente, lenticulares de material argiloso, de cor negra a cinzenta escura



Figura 26 - ES1 – Pequeno muro de suporte ineficaz, ravinamento de grande escala com circulação de uma linha de água, dispersão de material no sopé antes do muro de suporte



Figura 27 – ES1 - Evidências de novos ravinamentos

A ES2, composta por materiais silto-arenosos de cor alaranjada, apresenta um volume de cerca de 20 000 m³ e caracteriza-se por uma maior homogeneidade, em termos de composição, do que a ES1. Os resíduos que constituem este depósito, embora resultem das mesmas técnicas de concentração do minério, aparentam um maior conteúdo em argilas e plasticidade mais elevada do que os que ocorrem na ES1. Note-se que este depósito não apresenta qualquer tipo de estrutura de contenção, como um muro de contenção (Figura 28), pelo que a jusante se verifica dispersão de material (Figura 29).



Figura 28- E2 - Ravinamentos de grande escala com circulação de uma linha de água, inexistência de estruturas de suporte



Figura. 29 - E2 – Ravinamento de grande escala, dispersão do material no sopé, inexistência de estruturas de suporte

A falta de estruturas de contenção, de sistemas de impermeabilização superficial e de circuitos de drenagem nos depósitos de resíduos (Figura 17-a)) referidos resultam na geração de escorrências ácidas, devido à percolação dos resíduos pelas águas pluviais. As águas geradas, ao correrem livremente pela área e pela sua envolvente, provocam a contaminação dos solos por onde circulam, conduzindo à sua infertilidade, e/ou infiltram-se contribuindo para a degradação da qualidade das águas subterrâneas, assim como para a aceleração do processo de alteração do

maciço granítico em profundidade. As águas de circulação que não se infiltram acabam também por afluir à ribeira da Granja, trazendo potenciais repercussões para a sua qualidade.

O Talude da corta é muito instável e representa cerca de 2000m² da área mineira de Santo António. Apresentando sinais evidentes da descompressão do maciço (Figura 30) e deposição de blocos de dimensão métrica no sopé da corta (Figura 31). Com a agravante da inexistência de qualquer tipo de estrutura de contenção, o perigo e insegurança nesta área aumenta drasticamente.



Figura 30 - Talude da corta muito instável, evidência de descompressão do maciço

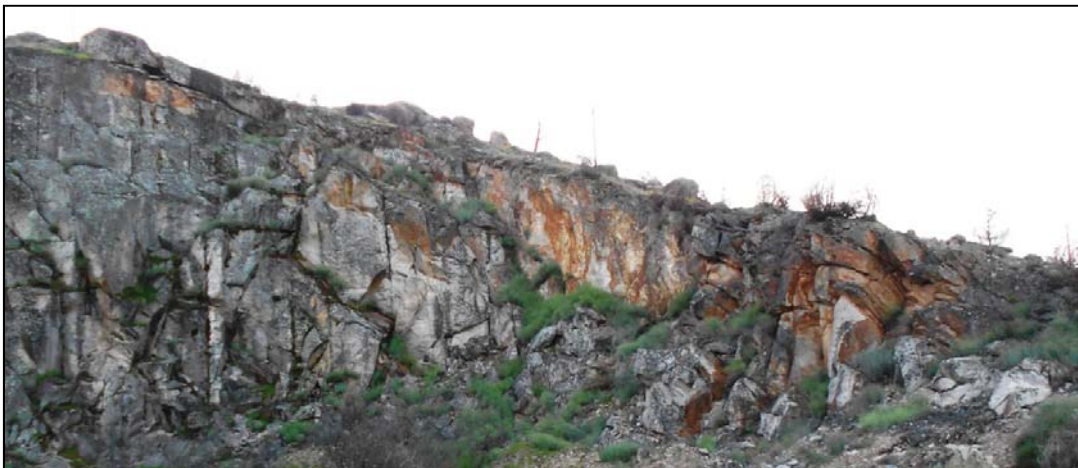


Figura 31 - Queda de blocos métricos no sopé da corta

3.3. Trabalhos de caracterização existentes

No âmbito da tese de doutoramento que procedeu o presente trabalho foram desenvolvidos diversos trabalhos de campo, de laboratório e de gabinete, com o objetivo de caracterizar os aspetos ambientais e de instabilidade geotécnica mais relevantes da área mineira de Santo António e com capacidade para comprometer a segurança e a saúde pública e os ecossistemas.

Os trabalhos de campo que decorreram na área mineira de Santo António foram:

- Reconhecimento geral;
- Rasteio de metais pesados com Avaliador Portátil de fluorescência de Rx;
- Poços de prospeção;
- Prospeção geofísica (perfis de resistividade elétrica e sísmica de refração);
- Ensaio de Penetração Dinâmica Ligeira (PDL);
- Recolha de amostras remexidas dos materiais de resíduos;
- Recolha de amostras indeformadas com amostradores de 4'' das escombreyras;
- Levantamento de descontinuidades em afloramentos contidos na zona mineira e na corta.

3.4. Caracterização dos materiais

No presente capítulo serão apresentados apenas os resultados dos estudos de caracterização da área com relevância para o tema em desenvolvimento, designadamente os trabalhos de reconhecimento de campo e de caracterização laboratorial dos depósitos de resíduos ES1 e ES2, bem como da corta.

Os trabalhos de laboratório que decorreram na área mineira de Santo António foram:

- Análise Granulométrica;
- Limites de Consistência;
- Expansibilidade;
- Teor em água;
- Valor de Azul de Metileno;
- Superfície específica;
- Grau de compactação;
- Ensaio triaxial

- Determinação da porosidade e índice de vazios;
- Ensaio de Permeabilidade.

3.4.1. Depósitos de Resíduos

Os trabalhos de campo permitiram concluir que a ES1 é composta por material bastante homogêneo brando, areno-siltoso, de cor cinza, com intercalações amareladas/alaranjadas, com níveis lenticulares argilosos de cor negra e expressão quase residual. A ES2 consiste em resíduo, também bastante homogêneo, areno-siltoso concrecionado de cor alaranjada. Apenas se atingiu o nível freático no poço realizado na fundação na ES2 a 1,3m de profundidade e no perfil de resistividade na base da ES2.

Os ensaios laboratoriais que visam a caracterização dos depósitos de resíduos mineiros foram os seguintes:

- Análise Granulométrica e limites de consistência – Quadro VI

Quadro VI – Composição granulométrica das amostras de resíduos, nas frações: cascalho, areia, silte e argila, adaptado de Roque, 2009

Ref.	Percentagem de material				w _L	w _P	Classificações	
	Cascalho	Areia	Silte	Argila			Textural	Unificada
ES1	1	41	53	5	NP	NP	Silte Arenoso	ML
ES2	3	15	73	9	NP	NP	Silte Arenoso	ML

w_L – Limite de Liquidez; w_P – Limite de Plasticidade; NP – Não Plástico

- Diagrama de classificação textural de cada uma das amostras de resíduos – Figura 32

Quadro VII – Ensaio de Expansibilidade, Teor em água, Valor de Azul de Metileno, Superfície específica, grau de compactação, Ensaio triaxial, porosidade, índice de vazios e permeabilidade, adaptado de Roque, 2009

Ensaio			ES1	ES2
Expansibilidade (%)			14	12
Teor em água – w (%)			14,2	19,3
Valor de Azul de Metileno - VBS			0.31	0,204
Superfície Específica – SE (m ² .g ⁻¹)			0,29	0,175
Grau de compactação	w _{op} (%)		20,4	26,4
	γ _{d max} (kN.m ⁻³)		15,4	14,1
	γ _{d in situ} (kN.m ⁻³)		12,86	13,08
Ensaio Triaxial - Parâmetros de Resistência ao Corte	(σ ₁ ' – σ ₃ ') máximo	φ [°] (°)	36,5	48
		c' (kPa)	19,5	0
Porosidade – n			0,51	0,51
Índice de vazios – e			1,05	1,05
Permeabilidade - K (m.s ⁻¹)			150 E-08	3,80 E-08

As amostras da ES1 e da ES2 classificam-se como siltes arenosos, são não plásticas e apresentam baixo teor em argila.

Roque (2009), no que respeita aos valores de ϕ' e c' obtidos, considerou-os demasiado altos face às características granulométricas dos materiais, sobretudo no que se refere à coesão, admitindo que esta, possa corresponder apenas uma coesão aparente, devido às ligações ferruginosas. Por este motivo, e tendo em conta a experiência e o conhecimento de materiais semelhantes, consideraram-se mais adequados, para os materiais em análise, os seguintes parâmetros geotécnicos: a escombreira ES1 apresenta ϕ' igual a 36° e uma c' nula, a escombreira ES2 apresenta ϕ' de valor igual a 38° e uma c' igualmente nula.

3.4.2. Corta

A caracterização do padrão de fracturação do talude da corta foi efetuada a partir do levantamento de 93 descontinuidades. As atitudes determinadas foram tratadas com recurso ao programa *Dips*®, usando a projeção equivalente (de Schmidt ou de igual área) no hemisfério inferior. Nas Figuras 34 e 35 apresenta-se o diagrama de densidade de fracturação e a respetiva roseta de orientações.

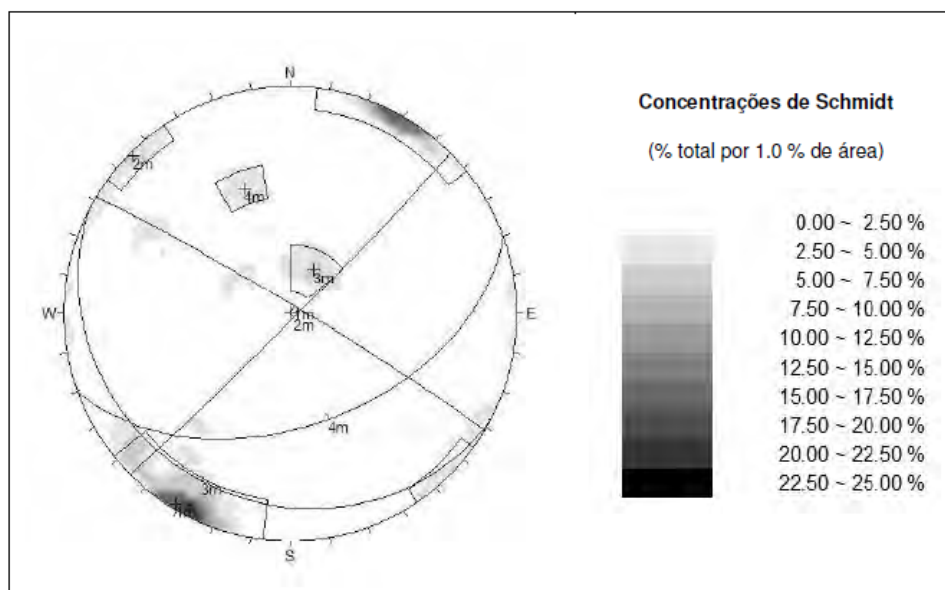


Figura 34 – Diagrama de densidade de fracturação da corta (projecção estereográfica - *software Dips©*), adaptado de Roque, 2009

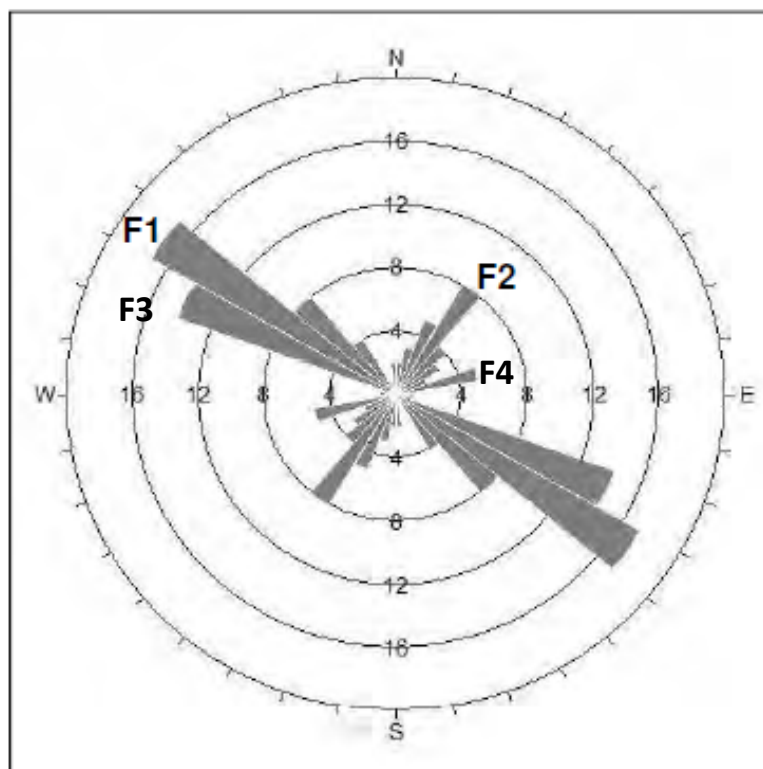


Figura. 35 – Roseta de fracturação da corta (projecção estereográfica - *software Dips©*), adaptado de Roque, 2009

As famílias F1 e F2 são classificadas, segundo a SIMR, como afastadas a muito afastadas (F_{3-2} e F_{2-1}), embora, pontualmente, pouco afastadas (F_4), não apresentam, em geral preenchimento, circulação de água e as paredes tendem a apresentar-se lisas e planares.

As famílias F3 e F4 são subhorizontais com espaçamentos, segundo o SIMR, como moderadamente afastadas (F_{4-3}), não apresentam, em geral preenchimento, circulação de água e as paredes tendem a apresentar-se lisas e planares. Estas tendem a ocorrer com maior persistência junto ao topo do talude, resultando, provavelmente, da descompressão do maciço junto à superfície.

No Quadro VIII encontra-se as características mecânicas das quatro famílias de descontinuidades identificadas.

Quadro VIII - Atitude das quatro famílias de descontinuidades identificadas por Roque, 2009

Famílias	Direção	Inclinação
F1	N 50-60° W	80° NE
F2	N 20-50° E	80° SE
F3	N 50-60° W	15° SW
F4	N 70° E	50° SE

3.5. Síntese das medidas de estabilidade preconizadas adequadas

No âmbito da dissertação de doutoramento referida no capítulo 1, foram apresentadas as ações de mitigação propostas mais adequadas para os problemas geotécnicos principais da mina de Santo António.

Para os depósitos de resíduos (ES1 e ES2) sugeriu-se estabilização com o reperfilamento dos taludes dos depósitos, confinamento *in situ*, de modo a protegê-los dos efeitos da erosão hídrica e eólica, e implementação de sistemas de drenagem com uma drenagem adequada, que permitirão controlar os efluentes internos e externos aos depósitos.

Para os taludes da corta recomendou-se limpeza dos blocos já caídos, desmonte controlado de blocos instáveis e realização de pregagens e/ou ancoragens nas zonas de maior instabilidade.

4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

DOS DEPÓSITOS DE RESÍDUOS MINEIROS

4.1. Introdução

A análise de estabilidade dos dois depósitos de resíduos (ES1 e ES2) foi efetuada através da modelação de duas situações distintas, uma que representa a situação atual e outra que representa a solução de estabilização, que corresponde ao reperfilamento dos taludes.

Já que o cálculo do fator de segurança não é tridimensional, foram definidos perfis-críticos para cada escombreira, de forma a analisar as condições de estabilidade em diferentes planos.

A definição dos perfis-críticos teve em consideração a geometria de cada depósito em estudo. Assim, definiram-se perfis perpendiculares aos taludes de maior altura e aos taludes de maior inclinação, uma vez que, do ponto de vista da estabilidade, estes são os que se afiguram mais condicionantes.

No que diz respeito à análise de estabilidade dos taludes reperfilados, selecionou-se o perfil-crítico que apresente condições mais desfavoráveis à estabilidade, para ambos os depósitos.

4.2. Dados de base

Para a análise de estabilidade das duas situações referidas no subcapítulo anterior, recorrendo-se ao *software Slope/W* é necessário atribuir características geotécnicas aos materiais, adquirir a topografia do talude, conhecer a situação hidrológica e o modelo determinístico a utilizar.

O modelo determinístico utilizado nessa análise foi o método de Morgenstern e Price.

No Quadro IX encontra-se um esquema dos dados de base utilizados e das ferramentas utilizadas para a análise de estabilidade dos depósitos de resíduos mineiros.

Quadro IX – Esquema dos dados de base e ferramentas utilizadas na análise de estabilidade

Dados de base (fontes)	Resultado obtido	Ferramenta utilizada
Parametrização das características geotécnicas da ES1 e ES2 (Roque, 2009)	Características geotécnicas dos materiais, segundo o critério de Mohr-Coulomb.	<i>Slope/W</i> Método de Morgenstern e Price <i>Seep/W</i>
Parametrização das características geotécnicas da fundação (Roque, 2009)		
Levantamento topográfico da área de estudo, cedido pela EDM (Roque, 2009)	Geometria dos perfis-críticos	

4.3. Modelo Geológico-geotécnico

Para o cálculo de estabilidade dos diferentes perfis-críticos de cada escombreira adotou-se um modelo com duas camadas, uma que representa os depósitos de resíduos, e a outra que representa a fundação.

As características atribuídas à fundação basearam-se no conhecimento adquirido em maciços rochosos similares e em ambientes semelhantes.

A parametrização das características geotécnicas dos materiais das escombreiras foi definida a partir da análise dos diversos dados de campo e resultados de ensaios laboratoriais disponíveis na tese de doutoramento que precede esta dissertação.

Numa análise de estabilidade os valores de coesão e ângulo de atrito têm que ser alvo de debate.

A coesão é um dos parâmetros mais complexos de determinar.

A mina da Santo António está inativa desde os anos 50. Ambos os depósitos de resíduos ES1 e ES2 formaram-se quando a mina se encontrava a laborar. Ao final de cerca de 60 anos as escombreiras revelam dispersão do material no sopé e ravinamentos de grande escala com geração de escorrências ácidas, devido à percolação dos resíduos pelas águas superficiais.

Com o intuito de obter-se os parâmetros geotécnicos mais adequados possível realizou-se uma análise de sensibilidade perante a coesão para o perfil-crítico que apresenta maiores indícios de instabilidade, como se verá mais adiante, o perfil C da ES1.

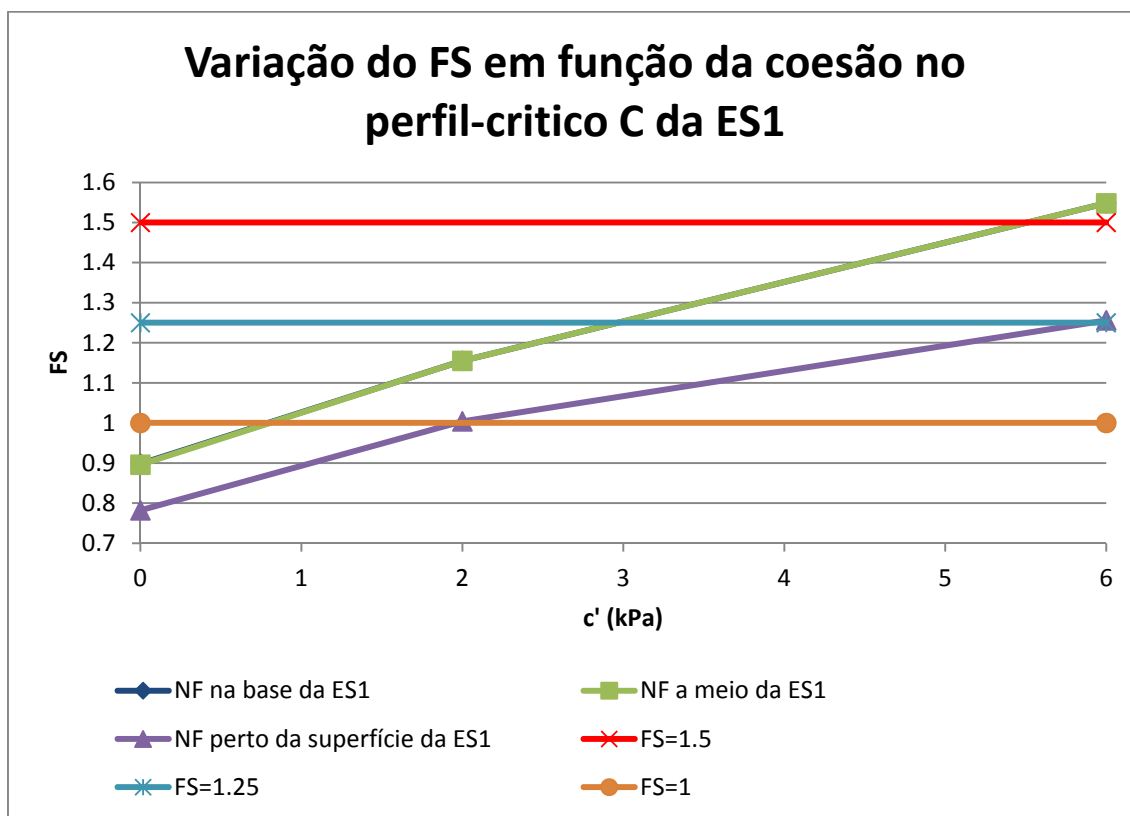


Figura 36 – Gráfico da variação do FS em função da coesão no perfil-crítico C da ES1

Observando a Figura 36 é de notar que apenas quando a coesão toma o valor de 6kPa é que o talude se encontra estável para o NF na base e a meio da ES1 e quando apresenta o valor de 3kPa a vertente encontra-se marginalmente instável.

A elevada compacidade destes resíduos areno-siltosos intercalados com níveis argilosos de espessura muito reduzida sugere ângulos de atrito interno também elevados ($\phi_{ES1}=36^\circ$ e $\phi_{ES2}=38^\circ$, Roque, 2009) Esta observação é corroborada pelas inclinações dos taludes naturais destes materiais, que são geralmente da ordem de 35° a 42° . A inclinação destes deve-se essencialmente às características friccionais dos materiais, com pequeno contributo de coesão.

Assim, nas condições habituais de terreno, os depósitos podem contar com uma coesão significativa e não nula, devido essencialmente a tensões capilares negativas instaladas nos contactos intergranulares e às interligações ferruginosas.

Trata-se, apesar da sua limitada validade, de valores de coesão aparente consideráveis que justifiquem a manutenção, durante largos períodos de tempo, de taludes subverticais nestes solos.

Assim, os materiais das escombreyas apresentam uma coesão aparente devido às ligações ferruginosas e à sucção capilar, no entanto, devido às suas características

granulométricas, admitiu-se que a sua coesão é nula tendo sempre em vista uma análise de estabilidade com a maior segurança possível.

No Quadro X estão representadas as características geotécnicas das duas camadas utilizadas no modelo geológico.

Quadro X – Características geotécnicas dos materiais para a análise de estabilidade

Materiais	ϕ' (°)	c' (kPa)	γ_h (kN.m⁻³)	γ_{sat} (kN.m⁻³)
ES1	36	0	14	-----
ES2	38	0	15,6	-----
Fundação	40	22	-----	22

Relativamente ao nível freático (NF), na ausência de dados que permitissem conhecer a sua posição e tendo em conta que esta poderá variar ao longo do ano, optou-se por considerar 3 situações possíveis: uma em que o NF encontra-se na base da escombreira, outra em que se localiza a meio dos depósitos de resíduos e, por último, considerou-se o NF perto da superfície, aproximadamente a ¼ da superfície, que representa a situação de estabilidade possível mais crítica.

4.4. Localização dos perfis-críticos

Para a escombreira ES1 foram definidos 4 perfis-críticos, devido ao seu elevado volume de materiais, que procuraram caracterizar em termos de estabilidade todas as vertentes potencialmente instáveis da escombreira. Na Figura 37 apresenta-se a localização dos 4 perfis-críticos (designados A, B, C e D) definidos.

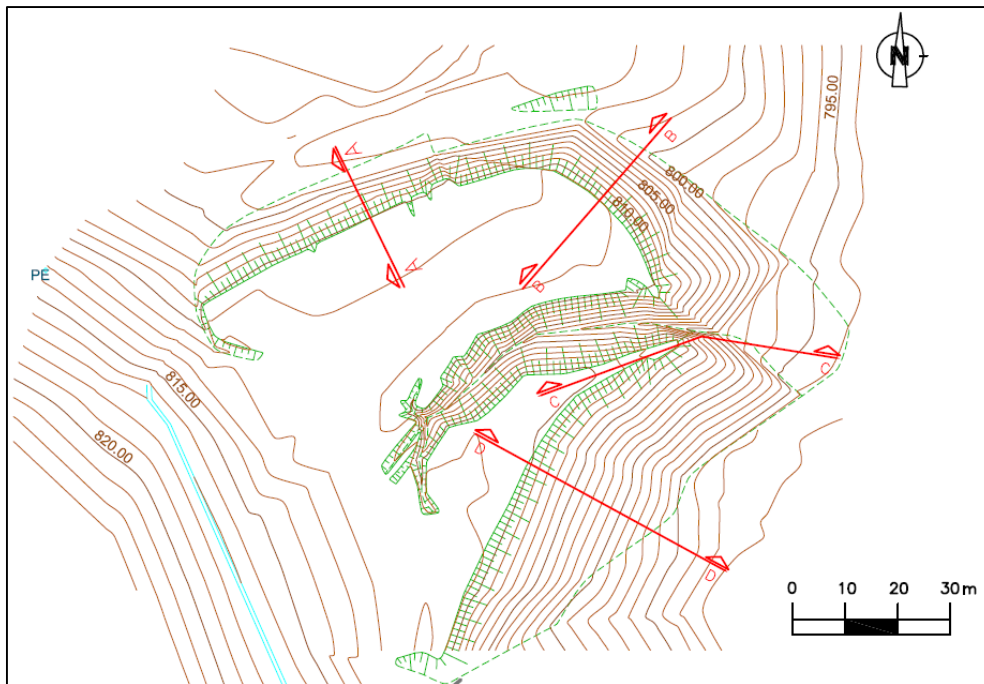


Figura 37 – Localização dos 4 perfis-críticos (designados A, B, C e D) definidos para ES1

No caso da escombreira ES2, face à volumetria dos materiais e à altura dos taludes em causa, consideram-se apenas 2 perfis-críticos para a análise de estabilidade. Na Figura 38 apresenta-se a localização dos 2 perfis-críticos (designados E e F) definidos.

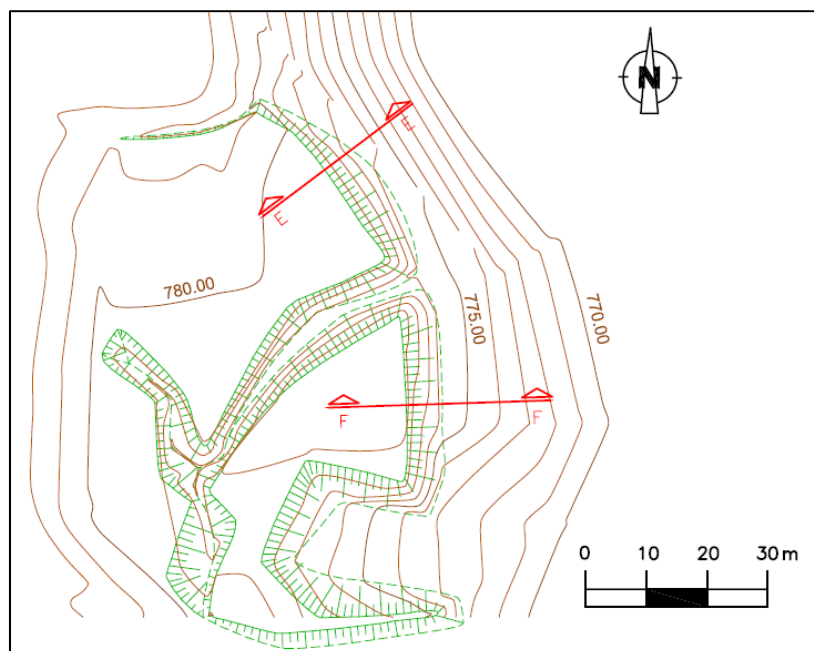


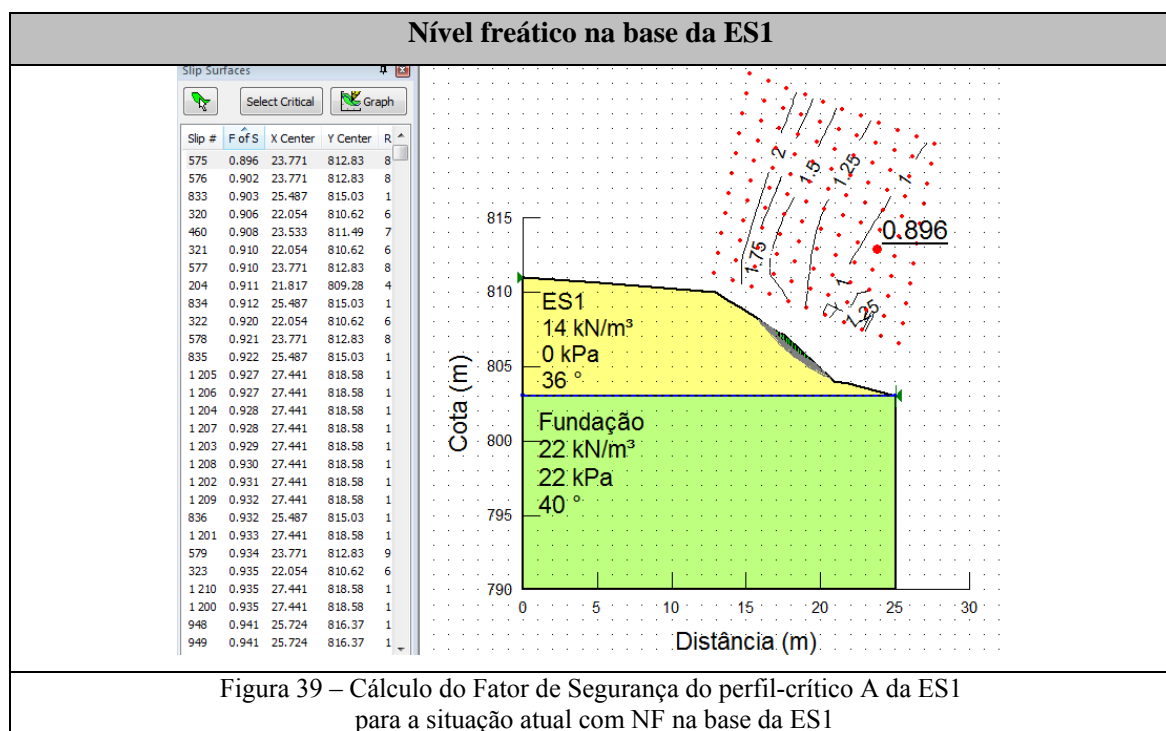
Figura 38 – Localização dos 2 perfis-críticos (designados E e F) definidos para ES2

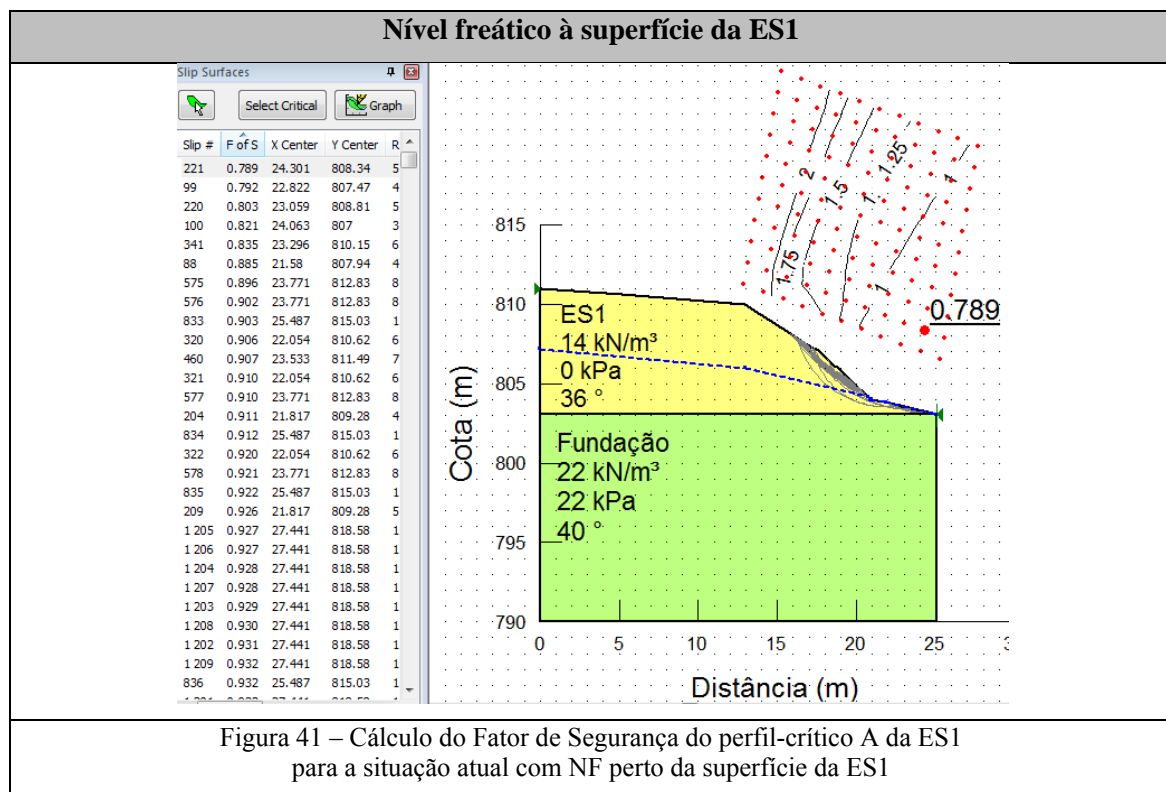
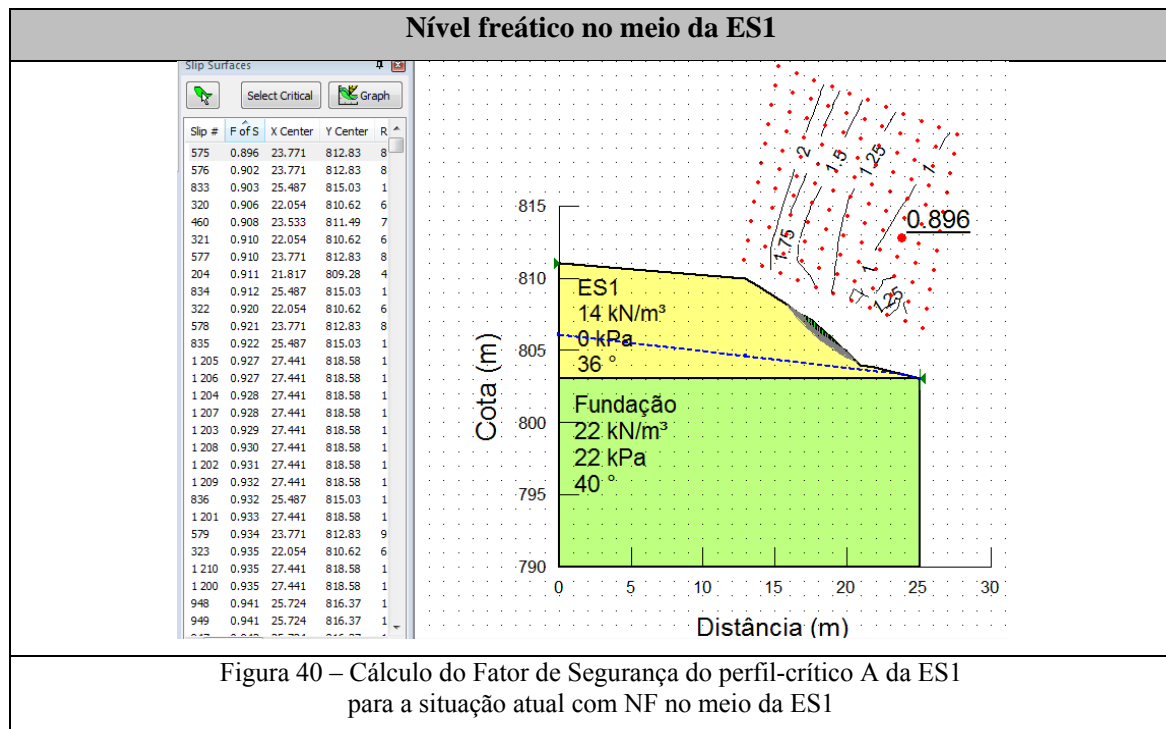
4.5. Cálculo do Fator de Segurança para a situação atual

Seguidamente estão apresentados os resultados obtidos da análise de estabilidade dos 4 perfis- críticos da ES1 identificados, A, B, C e D, variando o nível freático segundo as posições já referidas no subcapítulo 4.2.2.

- Perfil-crítico A:

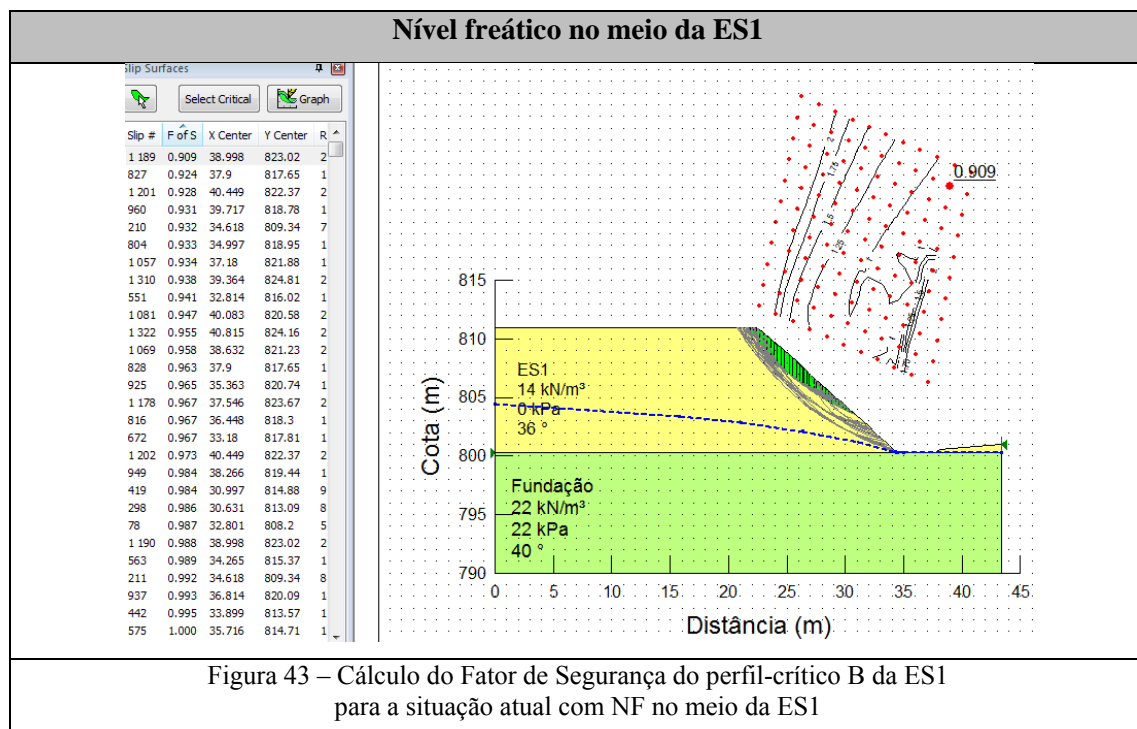
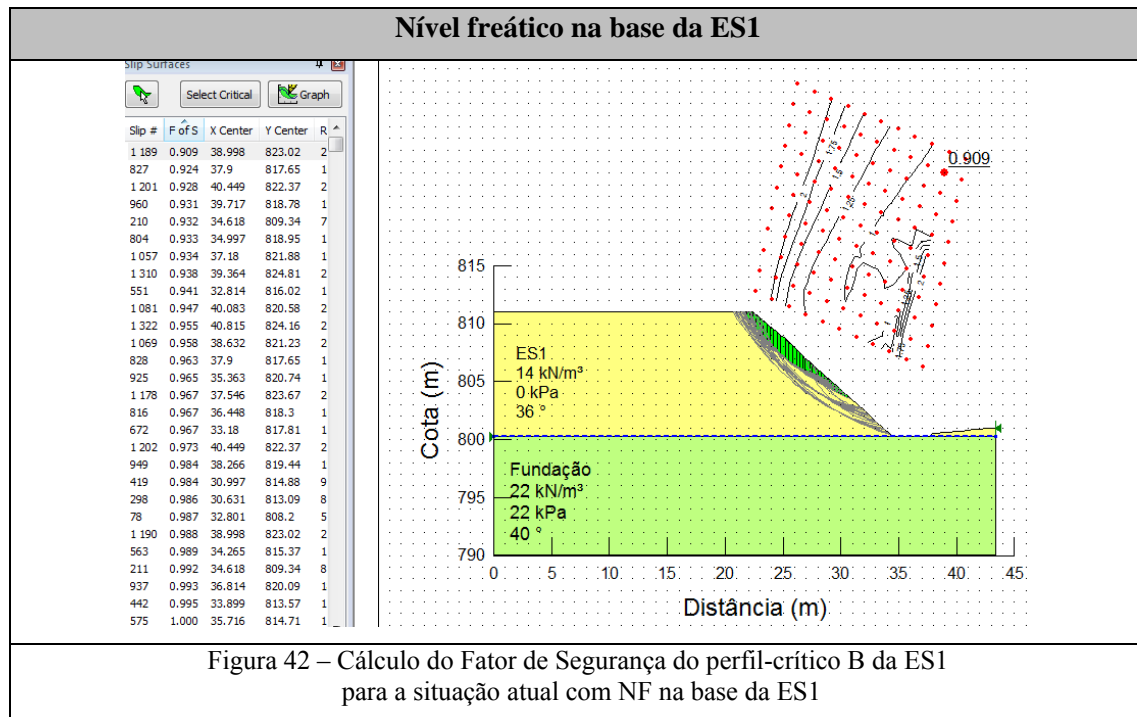
Após realizar a análise de estabilidade do perfil-crítico A da escombreira ES1, obtiveram-se as Figuras 39, 40 e 41.

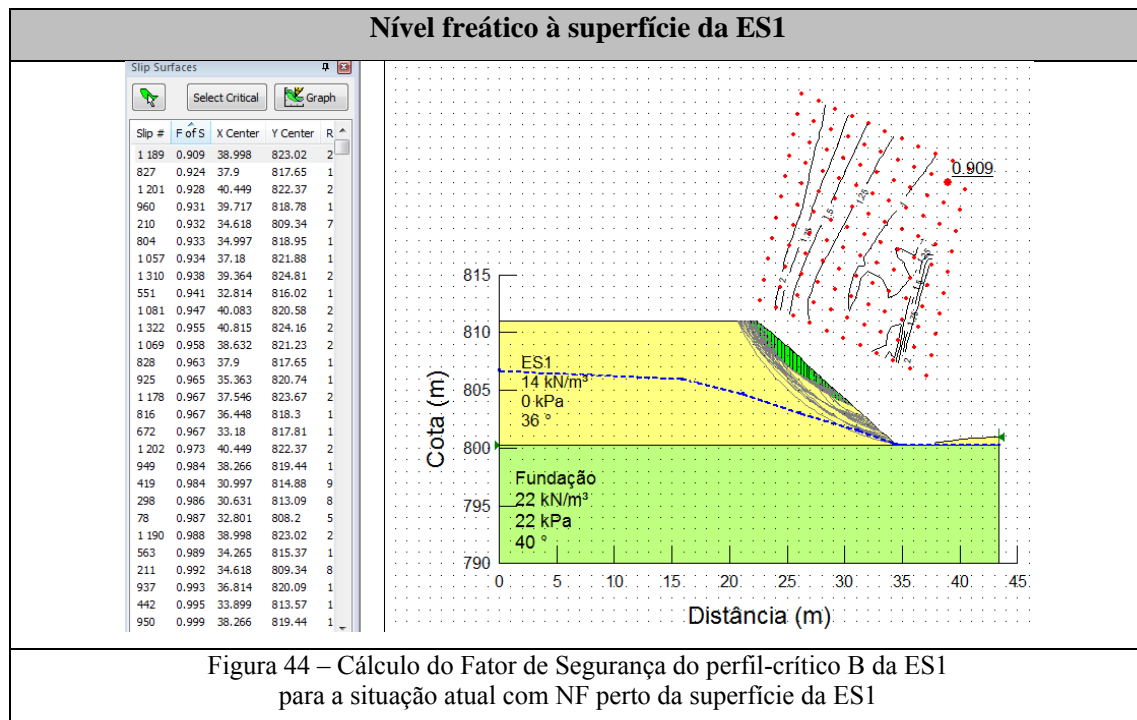




- Perfil-crítico B:

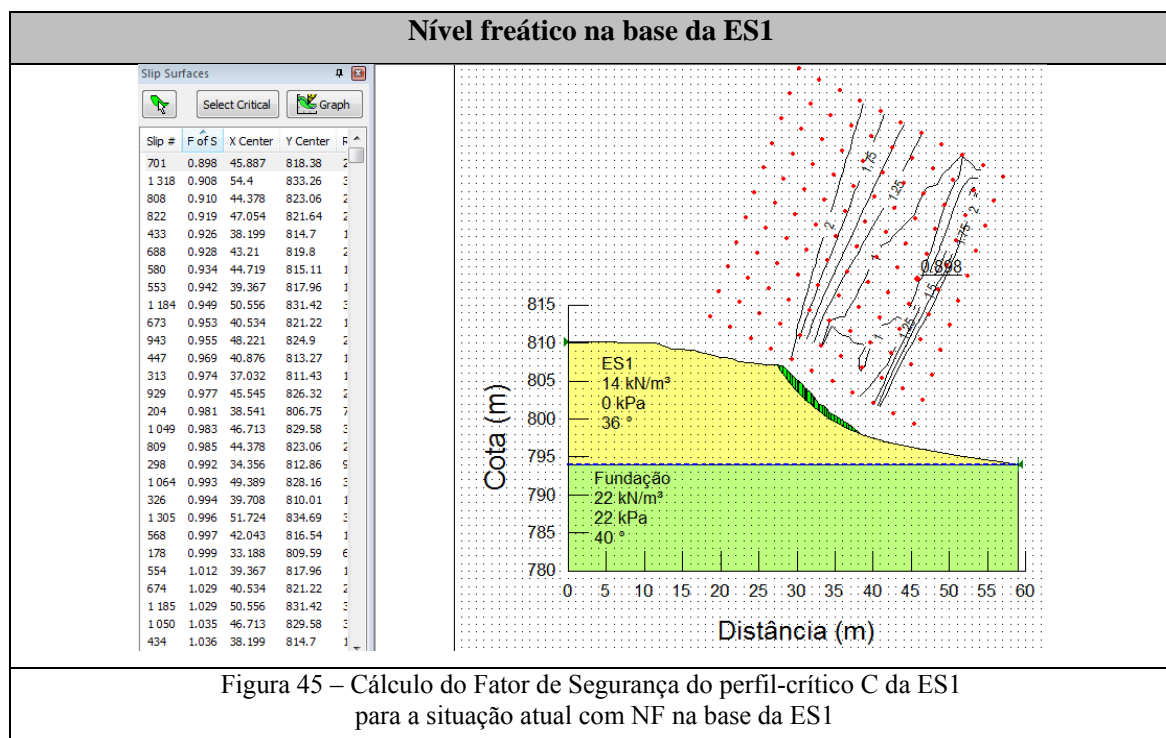
Depois de efetuar a simulação da análise de estabilidade do perfil-crítico B da escombreira ES1, variando o nível freático segundo as posições já referidas, obtiveram-se as Figuras 42, 43 e 44.

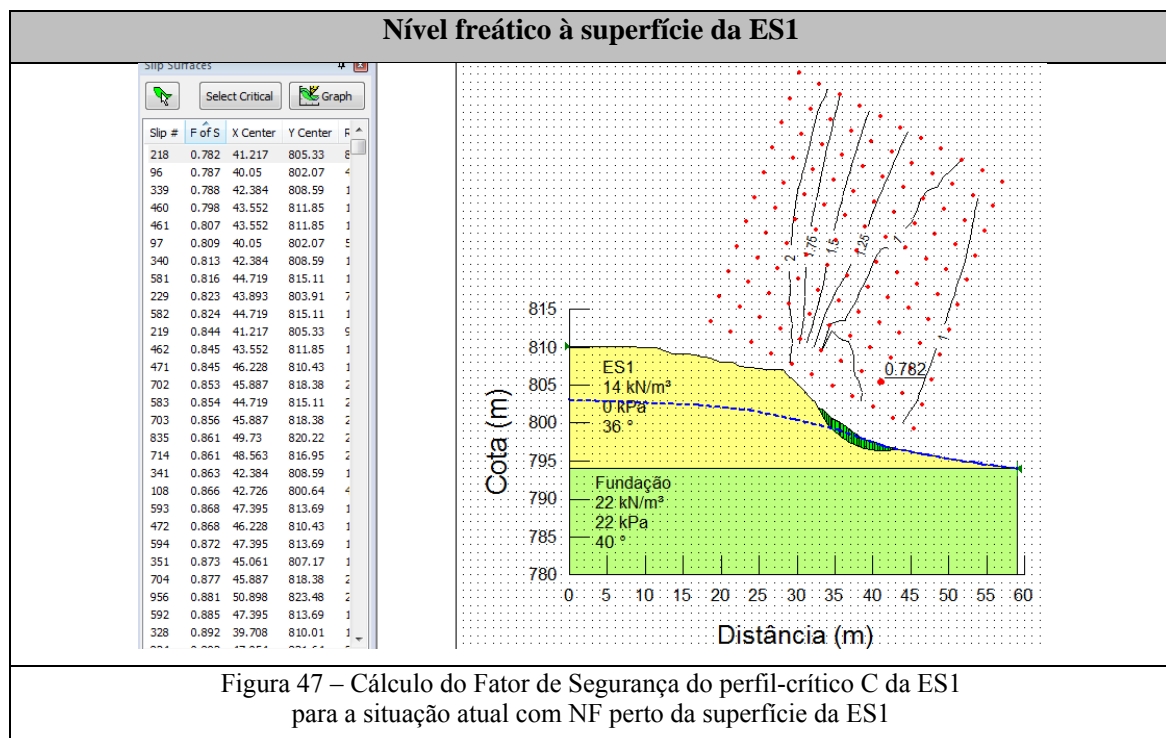
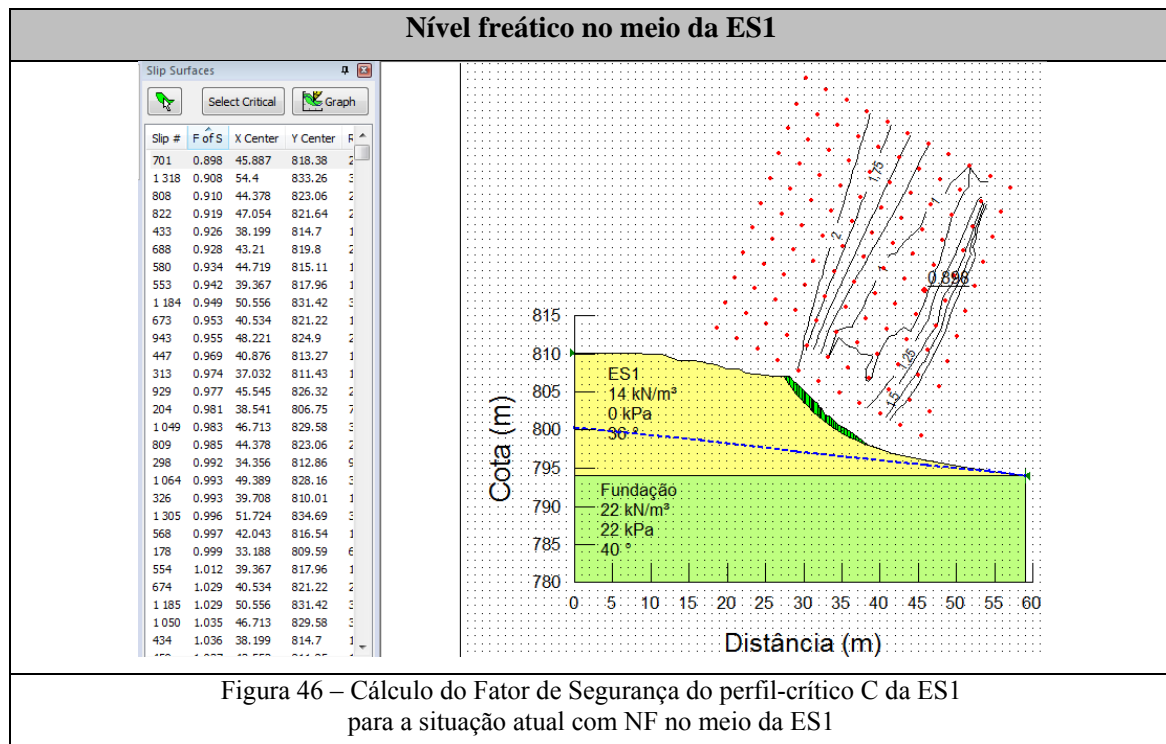




- Perfil-crítico C:

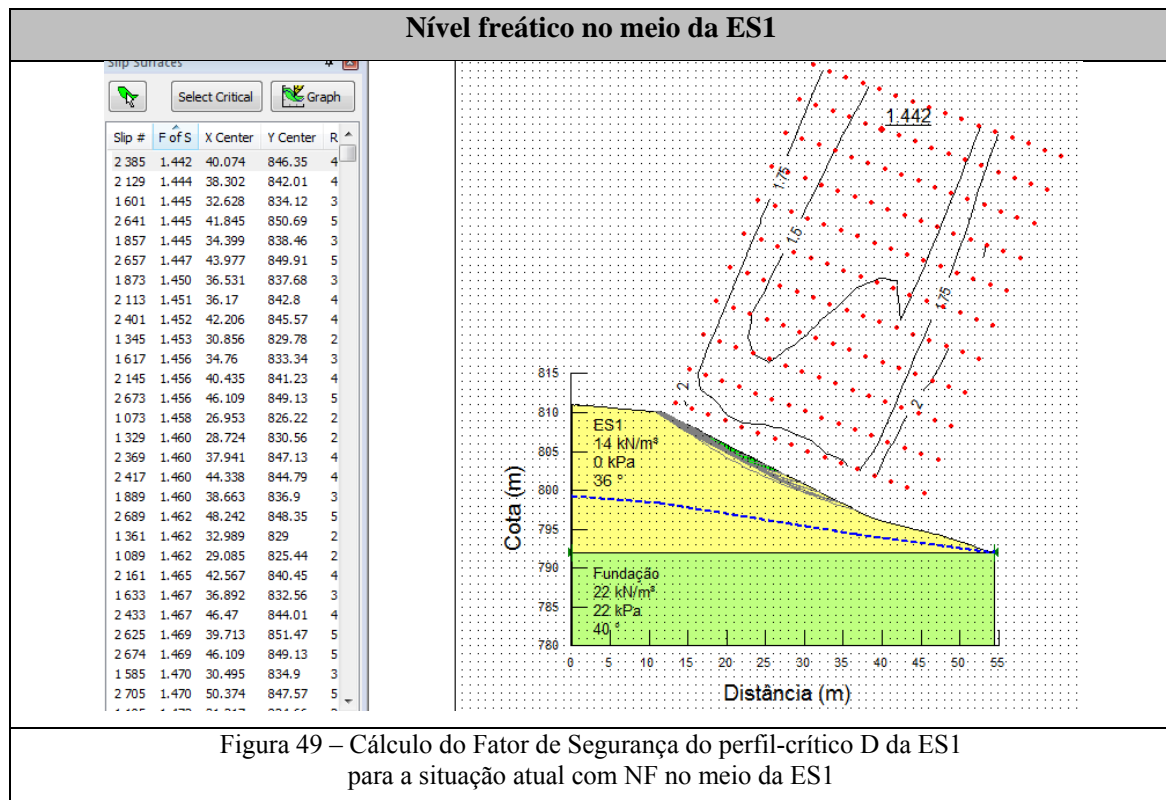
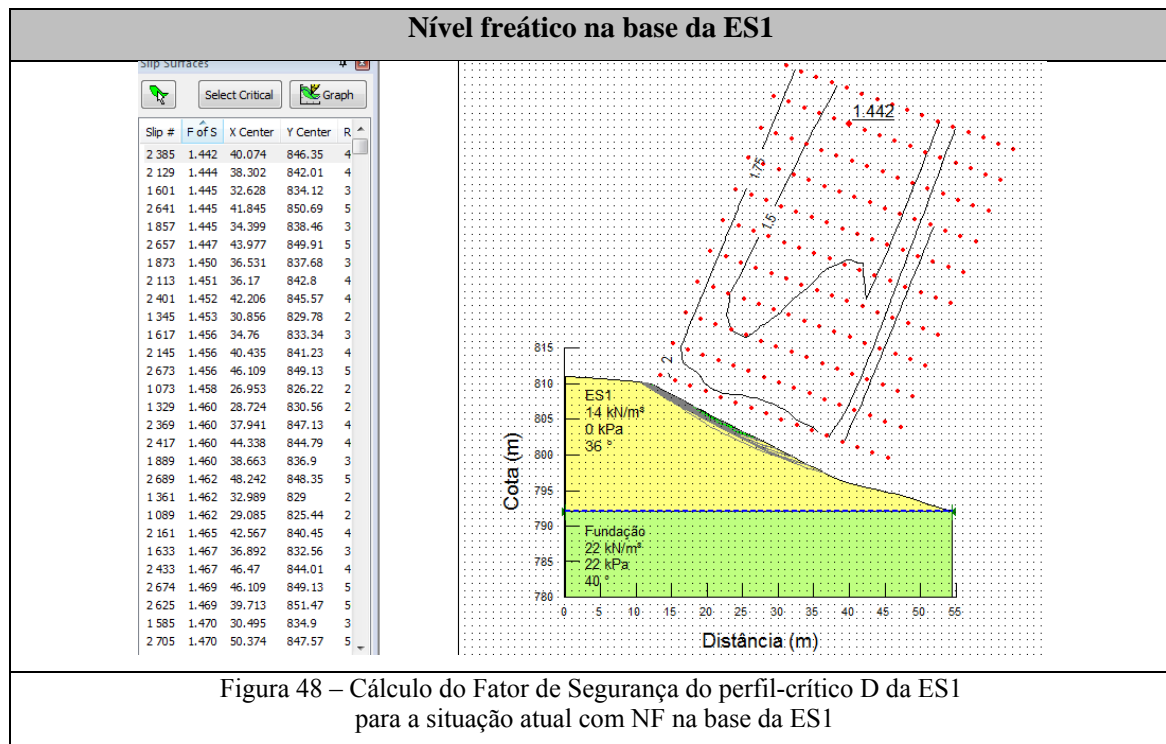
Após efetuar a análise de estabilidade do perfil-crítico C da escombreira ES1, variando o nível freático segundo as posições já referidas, obtiveram-se as Figuras 45, 46 e 47.

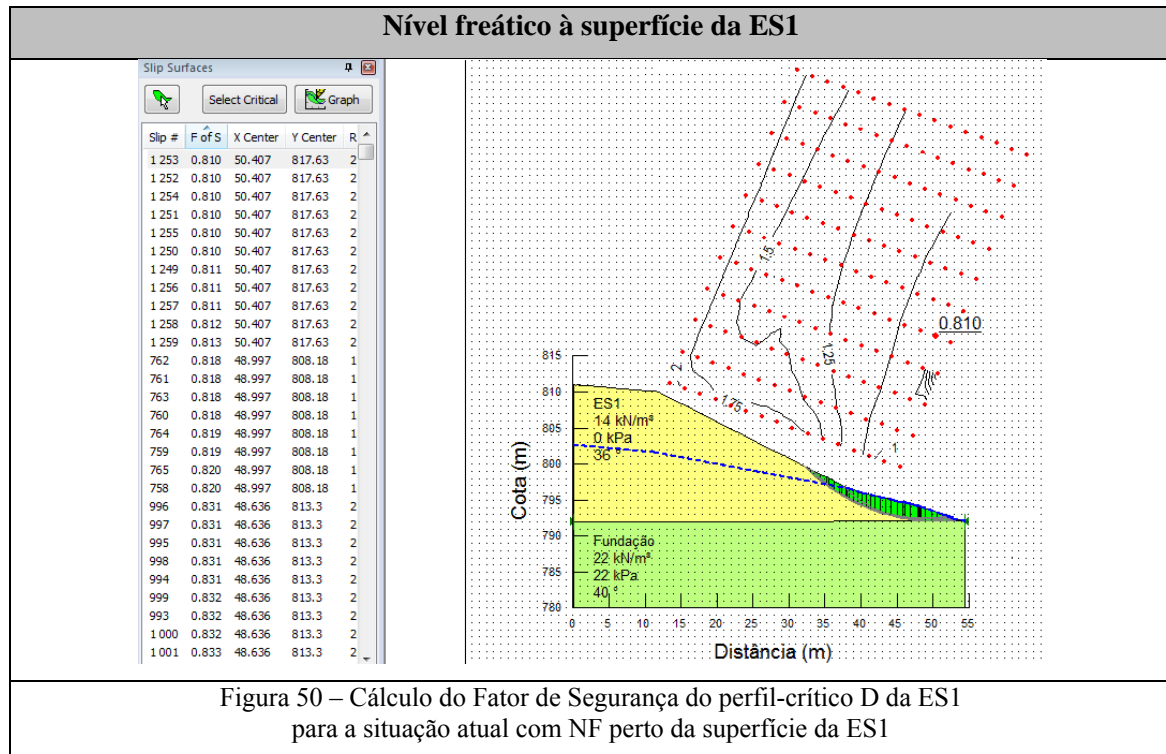




- Perfil-crítico D:

Seguidamente da simulação da análise de estabilidade do perfil-crítico D da escombreira ES1, variando o nível freático segundo as posições já referidas, obtiveram-se as Figuras 48, 49 e 50.

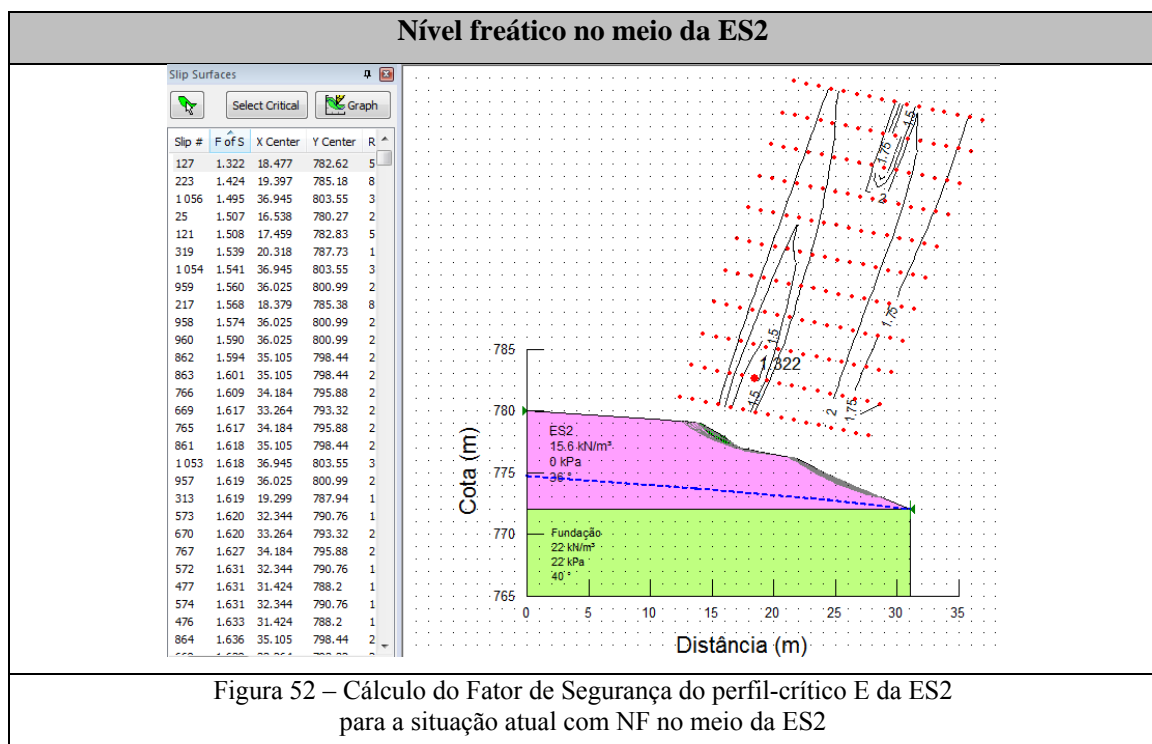
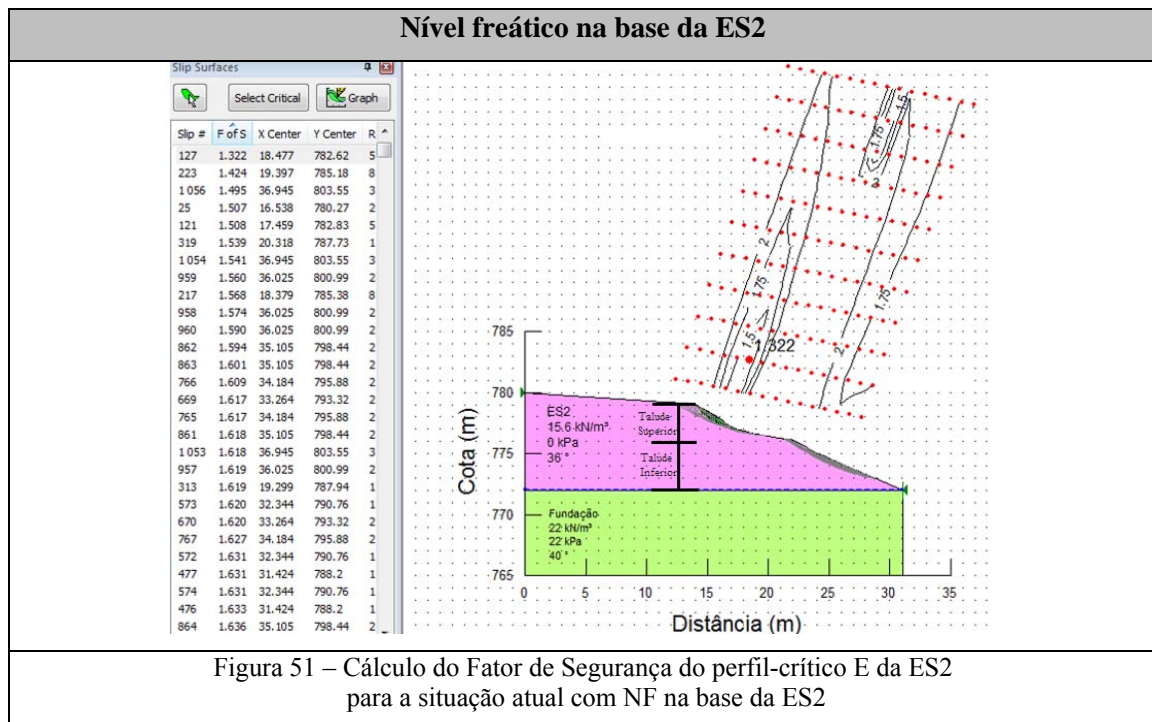


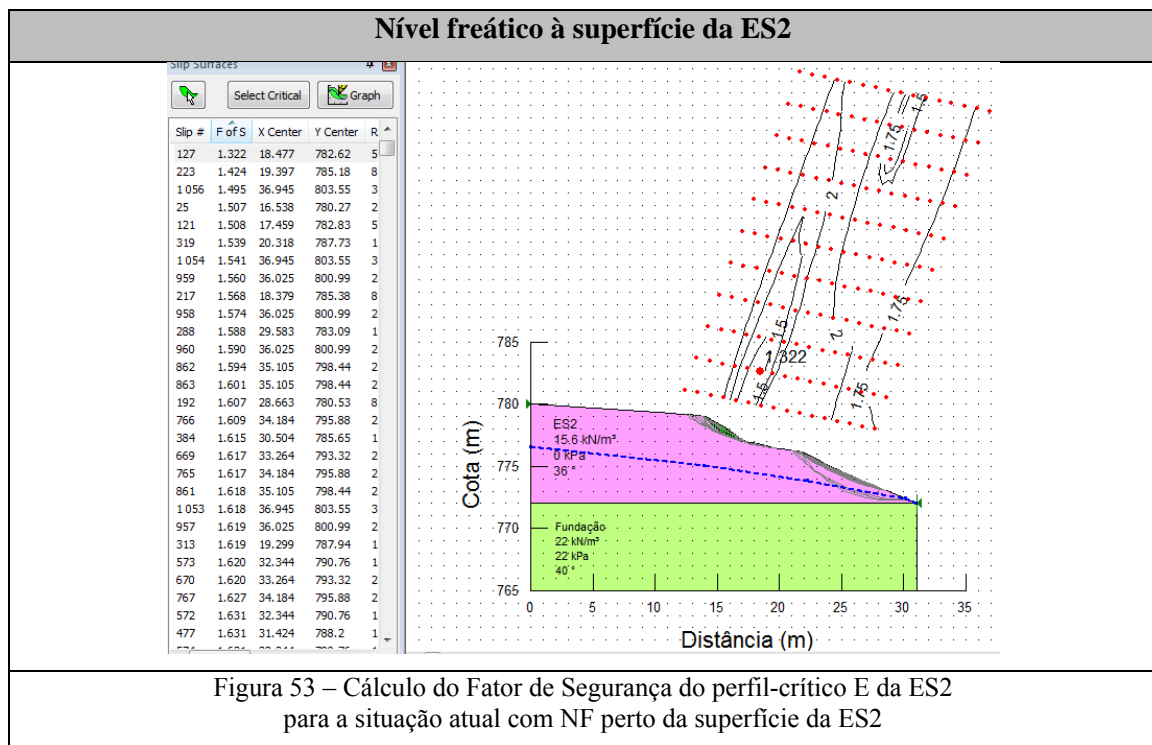


Seguidamente estão apresentados os resultados obtidos da análise de estabilidade dos 2 perfis- críticos da ES2 identificados, E e F, variando o nível freático segundo as posições já referidas no subcapítulo 4.2.2.

- Perfil-crítico E:

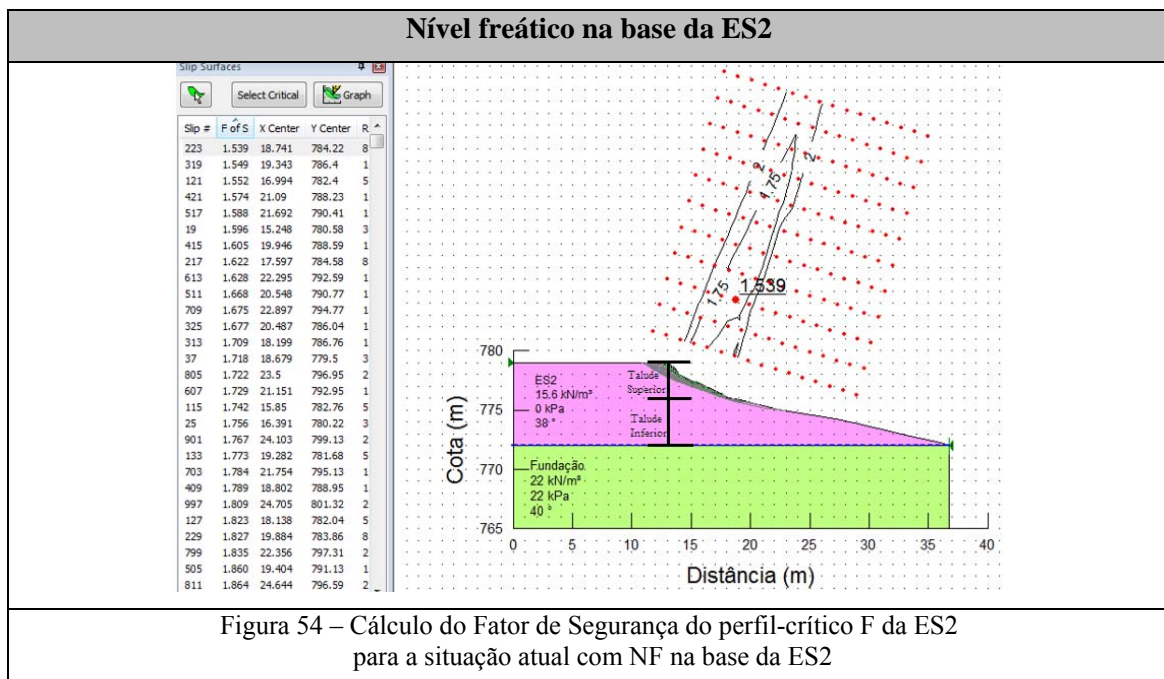
Após efetuar a análise de estabilidade do perfil-crítico E da escombreira ES2, variando o nível freático segundo as posições já referidas, obtiveram-se as Figuras 51, 52 e 53.

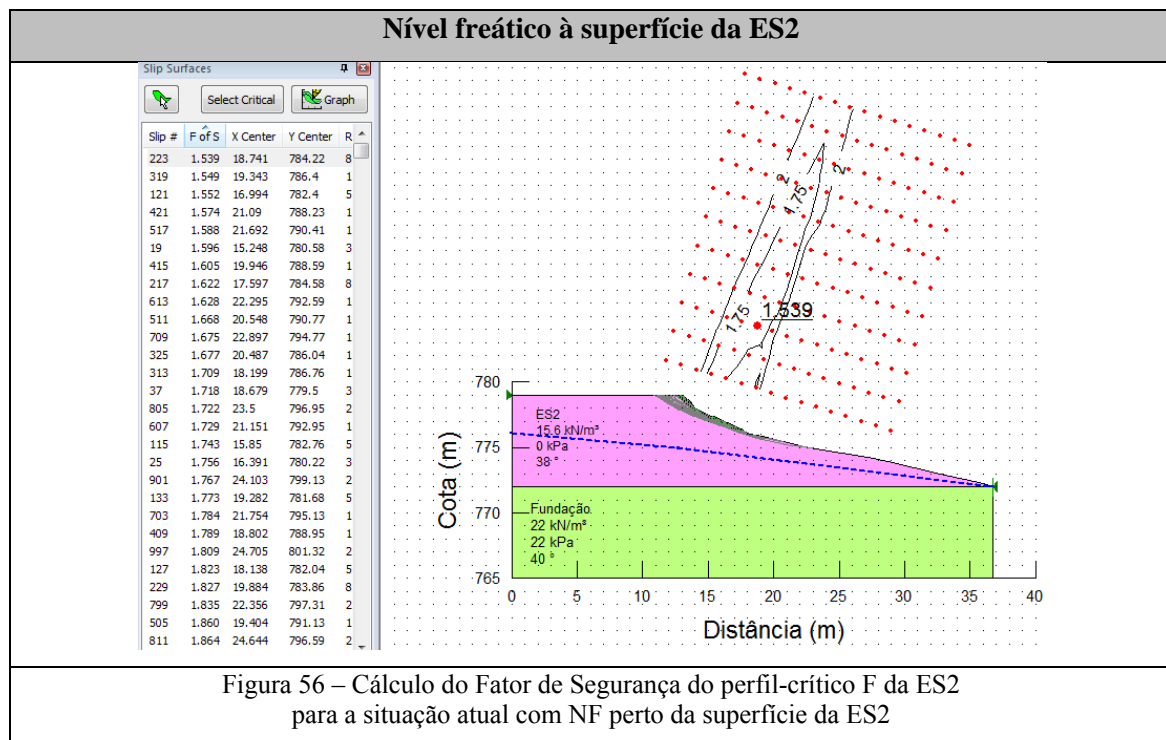
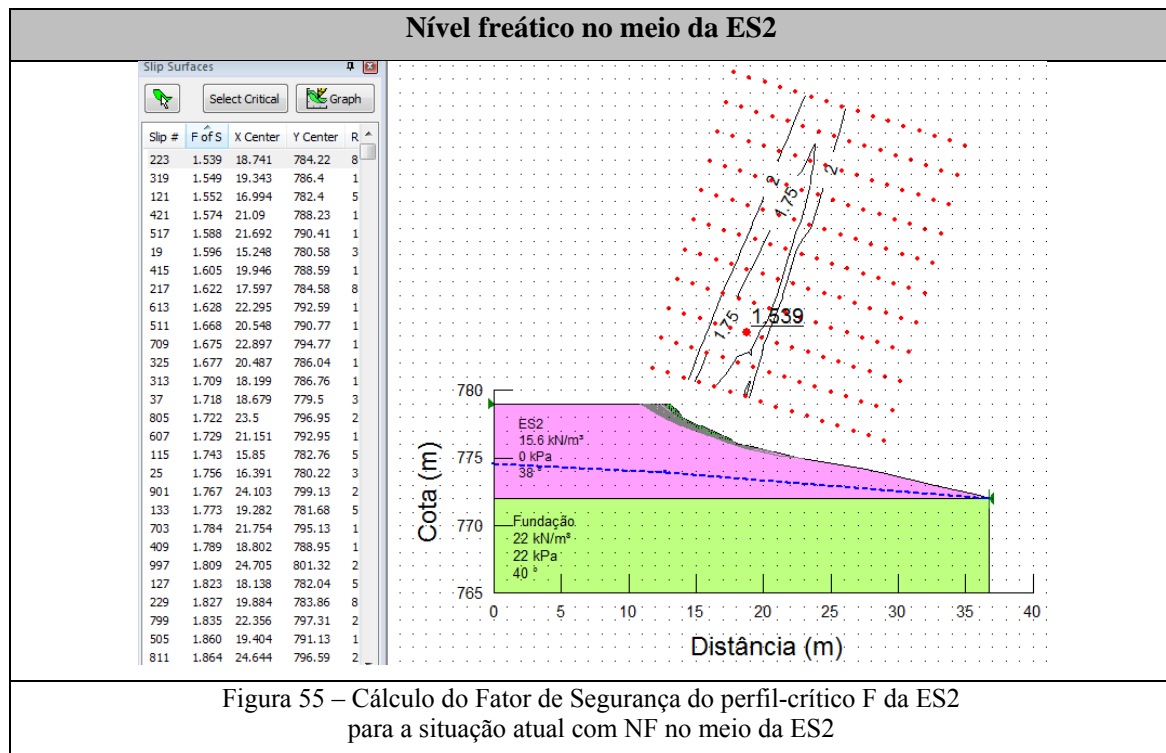




- Perfil-crítico F:

Depois da realização da análise de estabilidade do perfil-crítico F da escombreira ES2, variando o nível freático segundo as posições já referidas, obtiveram-se as Figuras 54, 55 e 56.





4.6. Discussão de resultados

Primeiramente apresenta-se a discussão dos resultados obtidos da análise de estabilidade dos 4 perfis- críticos da ES1 identificados A, B, C e D, variando o nível freático segundo as posições já referidas no subcapítulo 4.2.2.

O Quadro XI permite apresentar com uma maior clareza as características morfológicas dos diversos perfis-críticos da ES1 - a altura do talude e a inclinação da zona crítica.

Quadro XI – Características morfológicas dos perfis-críticos da ES1

Perfil	Altura do talude (m)	Inclinação da zona crítica (°)
A	6,967	36,984
B	10,76	41,750
C	13,013	34,375
D	17,975	27,028

Analisando o Quadro XI é possível concluir que o talude-crítico de maior inclinação está representado no perfil B. O de maior altura é o perfil-crítico D embora apresente uma reduzida inclinação. O perfil C corresponde ao segundo talude-crítico de maior inclinação e ao segundo perfil de maior altura.

No Quadro XII, encontram-se descritos os resultados do fator de segurança para as diversas posições do nível freático e a estabilidade relativa do talude dos 4 perfis-críticos da ES1.

Quadro XII - Resultados do fator de segurança para as diversas posições do nível freático e a estabilidade relativa do talude dos 4 perfis-críticos da ES1

Perfil	Posição do NF	Fator de Segurança	Estabilidade Relativa do talude
A	Base da escombreira	0,896	Instável (Rotura Certa)
	A meio dos depósitos	0,896	Instável (Rotura Certa)
	Perto da superfície	0,789	Instável (Rotura Certa)
B	Base da escombreira	0,909	Instável (Rotura Certa)
	A meio dos depósitos	0,909	Instável (Rotura Certa)
	Perto da superfície	0,909	Instável (Rotura Certa)
C	Base da escombreira	0,898	Instável (Rotura Certa)
	A meio dos depósitos	0,896	Instável (Rotura Certa)

	Perto da superfície	0,782	Instável (Rotura Certa)
D	Base da escombreira	1,442	Marginalmente instável
	A meio dos depósitos	1,442	Marginalmente instável
	Perto da superfície	0,810	Instável (Rotura Certa)

Observando o Quadro XII, é possível verificar que o nível freático tem influência nos movimentos de massa nas escombreyras, principalmente quando se encontra perto da superfície.

Averigua-se que o perfil-crítico C é o único que o valor de FS altera-se nas várias posições do NF modeladas, ou seja, é muito sensível à variação do NF.

O perfil-crítico que se apresenta condições de estabilidade superiores é o D, o que apresenta uma altura de talude superior.

O talude que apresenta um valor de FS constante para as várias posições de NF é o perfil-crítico B, o que apresenta uma maior inclinação da zona crítica.

Após observar os resultados obtidos para a escombreira ES1, é possível concluir que todos os perfis estão em situação de potencial instabilidade ($FS < 1,25$) exceto o perfil D, onde a estabilidade só se verifica quando o NF se localiza na base e a meio da ES1. Admite-se então, que nenhum dos taludes se encontra estável, pois não se obtiveram valores de FS superiores ou iguais a 1,5.

O valor FS mais baixo foi obtido para o perfil C ($FS = 0,782$) para a situação em que o NF se encontra perto da superfície. Este talude também apresenta o menor valor de FS obtido para a situação em que o NF se encontra na base da ES1 ($FS = 0,909$). É o perfil-crítico que apresenta condições mais desfavoráveis à estabilidade.

Identifica-se que, de um modo geral, as roturas são superficiais.

Neste caso, conclui-se que a inclinação, a altura do talude e a posição do nível freático são condicionantes da respetiva estabilidade.

Seguidamente está apresentada a discussão dos resultados obtidos da análise de estabilidade dos 2 perfis- críticos da ES2 identificados, E e F, variando o nível freático segundo as posições já referidas no subcapítulo 4.2.2.

Devido ao facto dos perfis-críticos da ES2 já se encontrarem com um ligeiro reperfilamento natural, considerou-se que era vantajoso realçar a existência de dois taludes, um superior, e outro inferior, como se apresenta nas figuras 44 e 47. O Quadro XIII permite apresentar, com uma maior clareza, as características morfológicas dos diversos perfis-críticos

da ES2 - altura total do talude, a altura do talude superior e inferior e a inclinação das zonas críticas.

Quadro XIII – Características morfológicas dos perfis-críticos da ES2

Perfil	Altura total do depósito (m)	Altura do talude superior (m)	Inclinação da zona crítica do talude superior(°)	Altura do talude inferior (m)	Inclinação da zona crítica do talude inferior(°)
E	7,965	2,000	31,758	3,965	24,130
F	7,000	3,000	29,778	2,000	11,933

Observando o Quadro XIII verifica-se que o perfil-crítico E apresenta uma altura total superior como também a inclinação das zonas críticas tanto do talude superior como do talude inferior. O perfil-crítico F apenas apresenta superior a altura do seu talude superior.

No Quadro XIV, encontram-se descritos os resultados do fator de segurança para as diversas posições do nível freático e a estabilidade relativa do talude dos 2 perfis-críticos da ES2.

Quadro XIV - Resultados do fator de segurança para as diversas posições do nível freático e a estabilidade relativa do talude dos 2 perfis-críticos da ES2

Perfil	Posição do NF	Fator de Segurança	Estabilidade Relativa do talude
E	Base da escombreira	1,322	Marginalmente instável
	A meio dos depósitos	1,322	Marginalmente instável
	Perto da superfície	1,322	Marginalmente instável
F	Base da escombreira	1,539	Estável
	A meio dos depósitos	1,539	Estável
	Perto da superfície	1,539	Estável

Observando o Quadro XIV, é possível verificar que ambos os perfis-críticos não sofrem alterações quando simulado as várias posições do nível freático.

Neste caso, averigua-se que o nível freático não tem influência nos movimentos de massa na ES2, contudo deverá sempre ter-se em atenção que a posição do NF é um dos fatores condicionantes da estabilidade de depósitos de resíduos como se verifica na discussão dos resultados da ES1.

Após observar os resultados obtidos para a escombreira ES2, é possível concluir que o perfil E encontra-se marginalmente instável e o perfil-crítico F encontra-se estável, pois para as diversas posições do NF obteve-se sempre valores superiores a 1,5.

Assim, o talude da ES2 que apresenta condições mais desfavoráveis à estabilidade é o perfil-crítico E.

Os taludes superiores de ambos os perfis-críticos apresentam valores de inclinação da zona crítica semelhantes, as diferenças dizem respeito à sua altura. Verificando a simulação de ambos os perfis para a situação em que o NF se encontra na base da ES2, as superfícies de rotura com valores de FS menores ocorrem no talude que apresenta uma inclinação da zona crítica superior (perfil-crítico E). Assim, é possível corroborar que a inclinação da zona crítica de um talude é um dos fatores condicionante na estabilidade de uma vertente.

Observa-se que, de um modo geral, as roturas são superficiais e todas as superfícies de rotura, a que a ES2 possa estar sujeita, são mais superficiais que as que ocorrem nos perfis-críticos da ES1. Esta última observação pode ser corroborada pelas características morfológicas dos dois depósitos de resíduos.

Identifica-se que, de um modo geral, as roturas são superficiais.

Neste caso é de notar que a inclinação da zona crítica e de um talude é um dos fatores decisivos na análise de estabilidade de um talude.

4.7. Cálculo do Fator de Segurança para a situação de reperfilamento de taludes e discussão de resultados

A geometria do reperfilamento teve em conta, além de um valor de FS compatível com condições de segurança ideais, a altura do talude, o impacto paisagístico da solução final e questões de funcionalidade, quer em fase de obra, quer a longo prazo (ex. monitorização de estabilidade e manutenção).

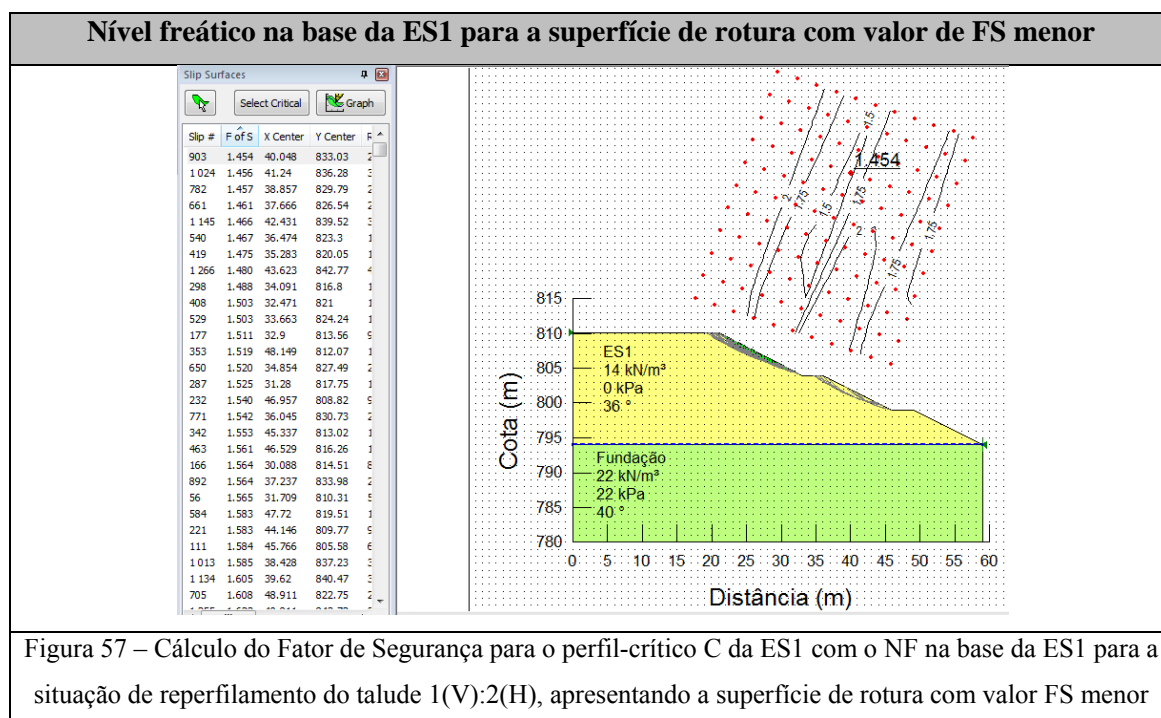
Considerando, para ES1, que o perfil que apresentava as condições mais desfavoráveis à estabilidade foi perfil-crítico C, a análise de estabilidade referente à solução de reperfilamento de taludes foi efetuada para este talude.

Numa primeira abordagem considerou-se o NF na base da escombreira (condição mais favorável à estabilidade), procedeu-se à modelação do talude C, com inclinação 1(V):1(H) com banquetas de 3m de largura a cada 6m. Obteve-se um FS de 1,222. Embora o valor de FS seja mais elevado que o obtido para a situação atual, admite-se que o talude ainda se encontra

instável (com rotura provável). Tendo em conta que se obteve um valor de FS inferior a 1,5, considerou-se que com esta inclinação não se verificam as condições de estabilidade ideais.

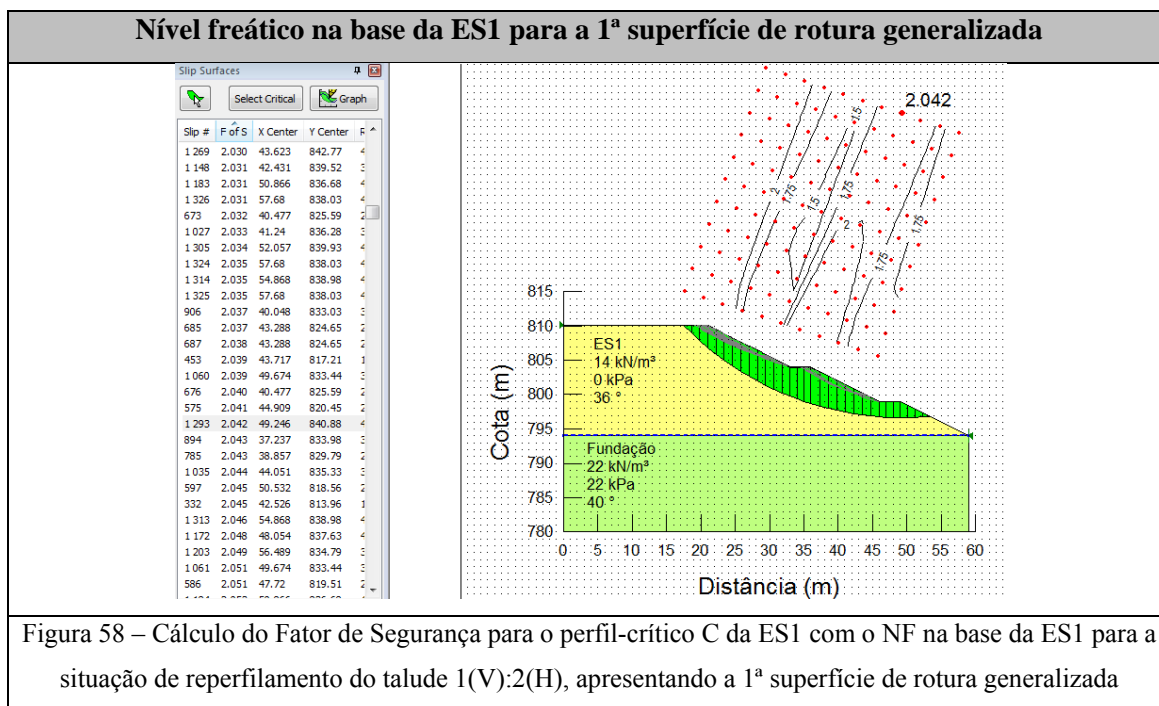
Procedeu-se então, à modelação do perfil com uma inclinação 1(V):2(H) com banquetas de 3m de largura a cada 6m.

Na Figura 57 está apresentada a modelação do perfil-critico C com o NF na base da ES1 com taludes 1(V):2(H) para a superfície de rotura com valor de FS menor.



O valor de FS obtido foi de 1,454. O valor de FS é inferior a 1,5, mas é muito próximo. A superfície de rotura correspondente a este valor de FS é muito superficial (menor que 1m) pelo que se admite que o talude encontra-se estável.

Na Figura 58 está apresentada a 1ª rotura de superfície generalizada, ou seja, a com valor de FS menor.

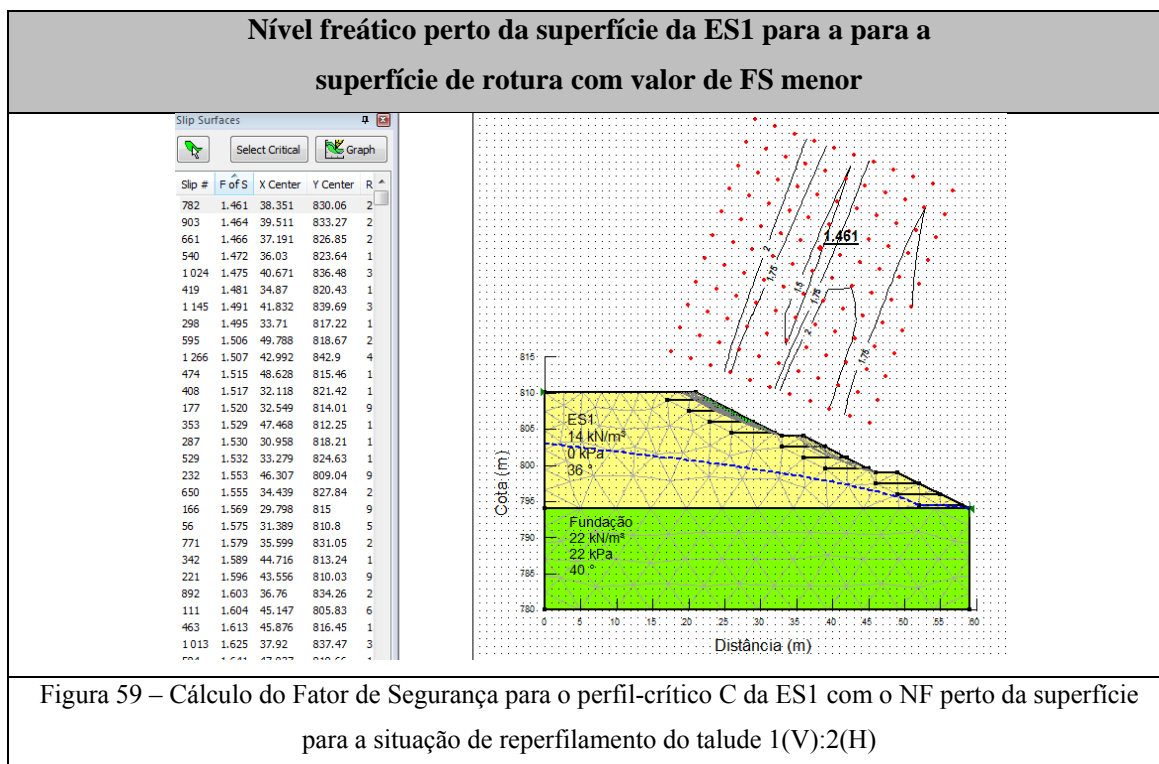


É de notar que esta superfície de rotura apresenta um valor de FS igual a 2,042. Ou seja, a possibilidade de este escorregamento ocorrer é bastante reduzida.

Assim, estão evidentes as condições de estabilidade ideais para o perfil-crítico C com o NF na base da ES1 (situação mais favorável à estabilidade).

Em segundo recorreu-se ao *software SEEP/W* e modelou-se o perfil-crítico C com o NF perto da superfície com as mesmas condições de reperfilamento 1(V):2(H) com banquetas de 3m de largura a cada 6m e com drenos de 6 m de comprimento, espaçados em 1,5 m, a começar a 0,5 m acima da base dos taludes.

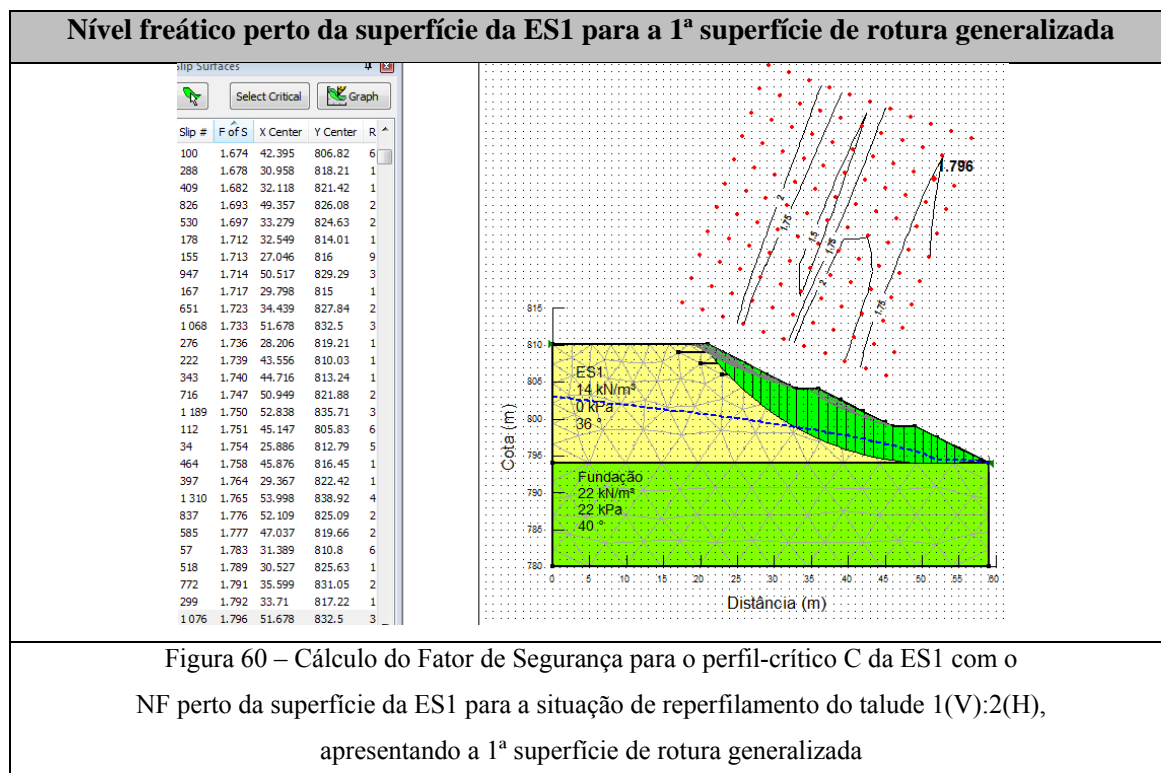
Na Figura 59 apresenta-se o resultado desta simulação para a superfície de rotura com valor de FS menor.



O valor de FS obtido foi de 1,461. Embora seja superior que o valor de FS obtido na primeira abordagem é inferior a 1,5 mas é muito próximo. A superfície de rotura correspondente a este valor de FS é muito superficial (menor que 1m) pelo que se admite que o talude encontra-se estável.

Comparando esta última análise em que o NF encontra-se perto da superfície com a modelação apresentada na Figura 57 em que o NF encontra-se na base da ES1 evidencia-se a influência da posição do NF na análise de estabilidade do talude.

Na Figura 60 está apresentada a 1ª rotura de superfície generalizada, ou seja, a com valor de FS menor.



É de notar que esta superfície de rotura apresenta um valor de FS igual a 1,796. Ou seja, a possibilidade de este escorregamento ocorrer é bastante reduzida.

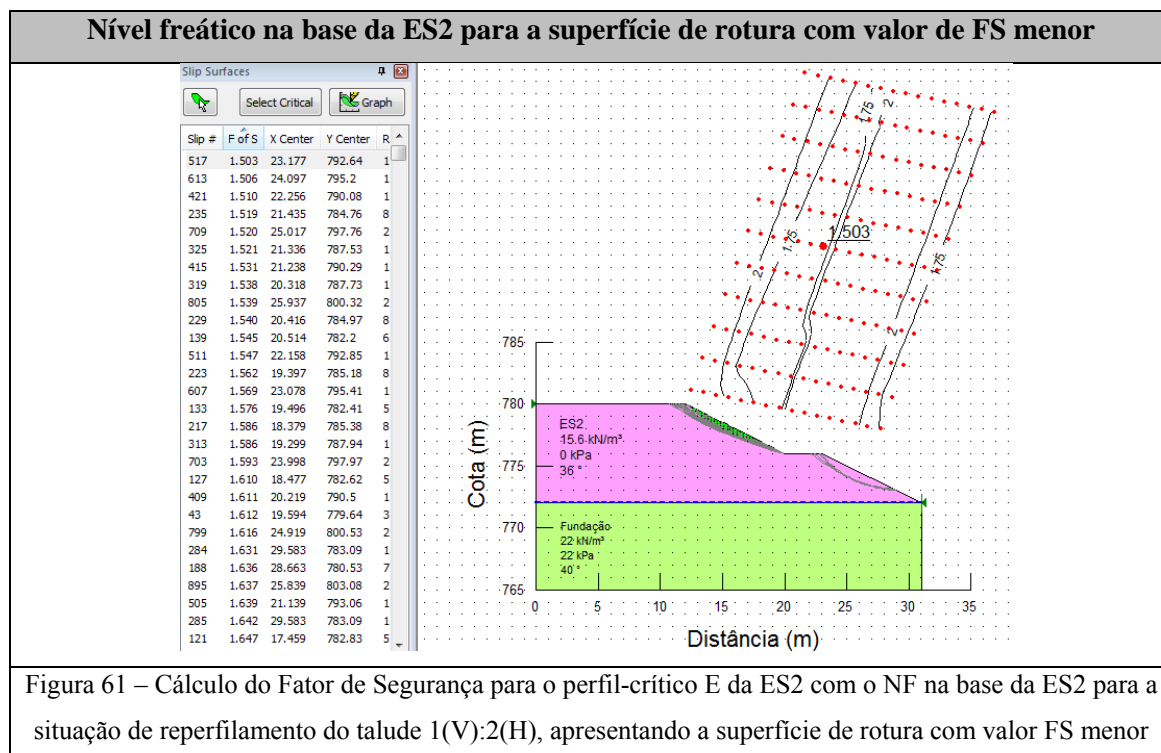
Mais uma vez, comparando esta última análise em que o NF encontra-se perto da superfície com a modelação apresentada na Figura 58 em que o NF encontra-se na base da ES1 evidencia-se a influência da posição do NF na análise de estabilidade do talude.

Assim, se a remodelação da ES1 seguir as condições de remodelação e de drenagem do perfil-crítico C averigua-se que estão evidentes as condições de estabilidade ideais ao longo de todo o ano neste depósito de resíduos.

Na ES2, o perfil-crítico F é o perfil que se considerou que se encontrava potencialmente instável. Assim, a análise de estabilidade referente à solução de reperfilamento de taludes foi executada para este talude.

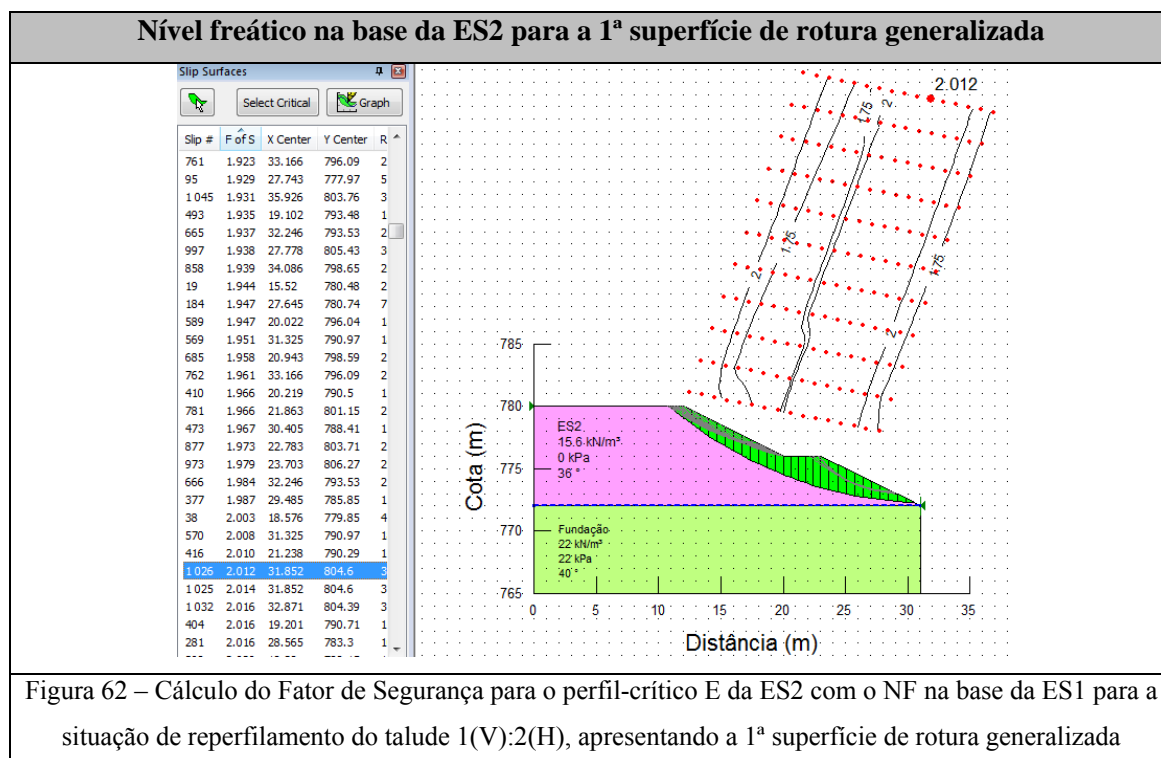
Numa primeira abordagem considerou-se o NF na base da ES2 e realizou-se a modelação do perfil com uma inclinação 1(V):2(H) com uma banquetta de 3m aos 4m.

Na Figura 61 ilustra-se a modelação do perfil-crítico E com taludes 1(V):2(H) para a superfície de rotura com valor de FS menor.



O valor de FS obtido foi de 1,503. O valor de FS é superior a 1,5. Admite-se que o talude encontra-se estável já que o FS apresenta um valor superior a 1,5.

Na Figura 62 está apresentada a 1ª rotura de superfície generalizada, ou seja, a com valor de FS menor.

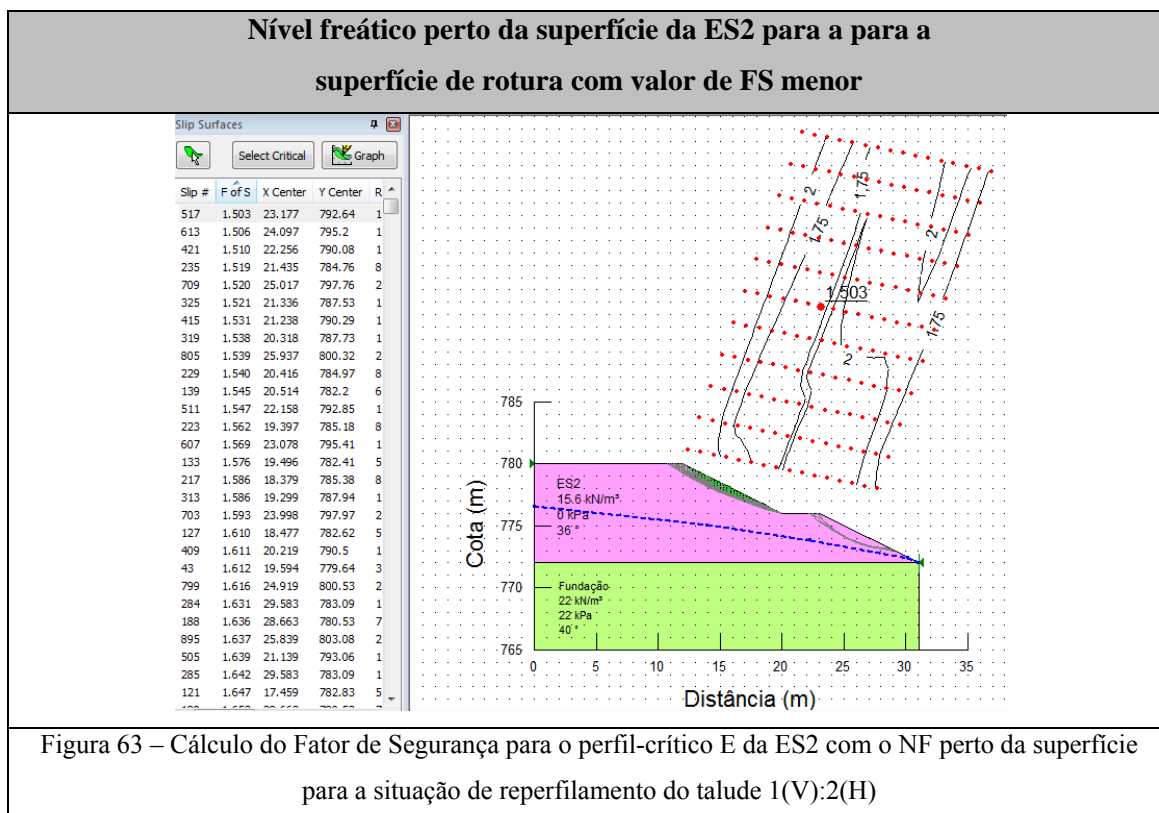


É de notar que esta superfície de rotura apresenta um valor de FS igual a 2,012. Ou seja, a possibilidade de este escorregamento ocorrer é bastante reduzida.

Assim, estão evidentes as condições de estabilidade ideais para o perfil-crítico E com o NF na base da ES2 (situação mais favorável à estabilidade).

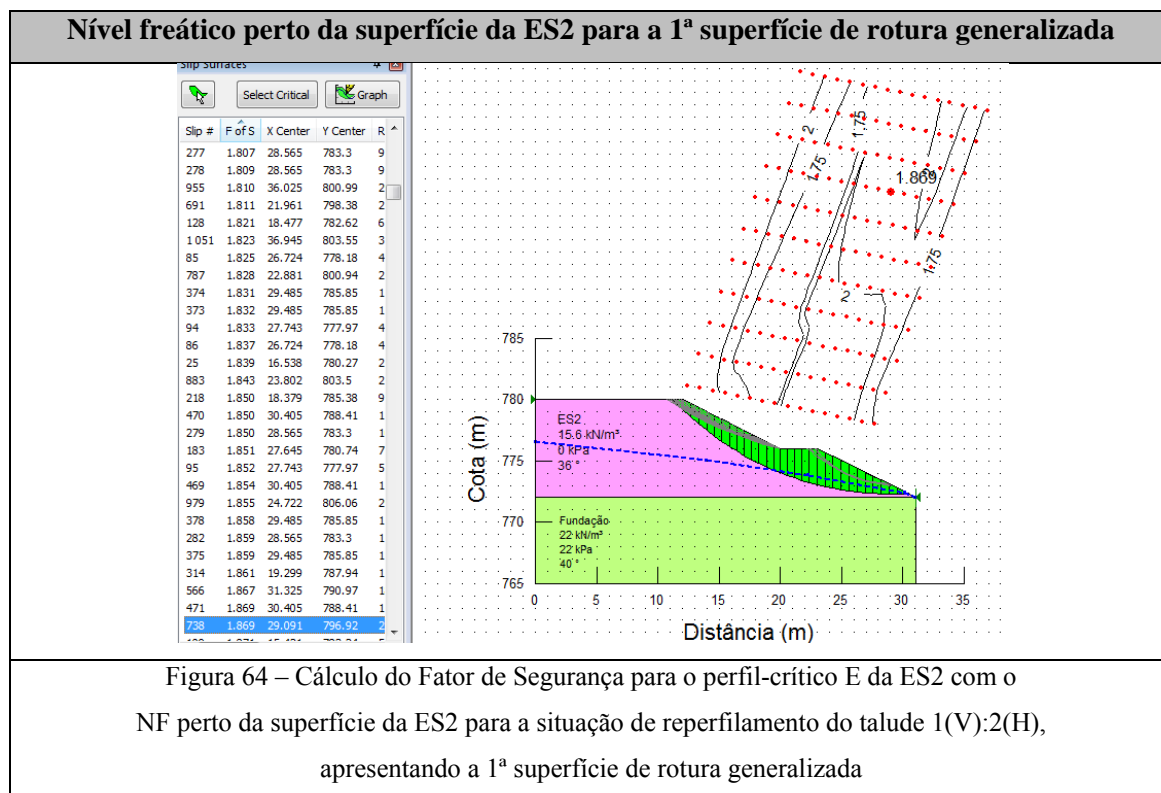
Em segundo modelou-se o perfil-crítico E com o NF perto da superfície com as mesmas condições de reperfilamento 1(V):2(H) com uma banqueteta de 3m aos 4m

Na Figura 63 apresenta-se o resultado desta simulação para a superfície de rotura com valor de FS menor.



O valor de FS obtido foi de 1,503. O valor de FS é superior a 1,5. Admite-se que o talude encontra-se estável já que o FS apresenta um valor superior a 1,5. No entanto, recomenda-se a colocação de sistema de drenagem interna, drenos de 6 m de comprimento, espaçados em 1,5 m, a começar a 0,5 m acima da base dos taludes tendo sempre em vista uma análise de estabilidade com a maior segurança possível.

Na Figura 64 está apresentada a 1ª rotura de superfície generalizada, ou seja, a com valor de FS menor.



É de notar que esta superfície de rotura apresenta um valor de FS igual a 1,809. Ou seja, a possibilidade de este escorregamento ocorrer é bastante reduzida.

Comparando esta última análise em que o NF encontra-se perto da superfície com a modelação apresentada na Figura 62 em que o NF encontra-se na base da ES2 evidencia-se a influência da posição do NF na análise de estabilidade do talude.

Assim, se a remodelação da ES2 seguir as condições de remodelação do perfil-crítico E averigua-se que estão evidentes as condições de estabilidade ideais ao longo de todo o ano neste depósito de resíduos, no entanto, recomenda-se a colocação de sistema de drenagem inter, drenos de 6 m de comprimento, espaçados em 1,5 m, a começar a 0,5 m acima da base dos taludes tendo sempre em vista uma análise de estabilidade com a maior segurança possível, como referido anteriormente.

5. ANÁLISE CINEMÁTICA DOS TALUDES DA CORTA

5.1. Introdução

Na análise cinemática da corta simula-se a possibilidade de ocorrência de tombamentos, de deslizamentos planares e deslizamentos em cunha.

Foram definidos talude-críticos para a corta, de forma a analisar as condições de cinemáticas em diferentes planos.

A definição dos taludes-críticos teve em consideração a geometria da corta.

5.2. Dados de base

Para realizar uma análise cinemática, com recurso ao *software Dips*© da *Rockscience*, são necessárias as atitudes das descontinuidades do levantamento de descontinuidades e as atitudes dos diferentes taludes-críticos da corta identificados.

No Quadro XV encontra-se um esquema dos dados de base utilizados e das ferramentas utilizadas para a análise cinemática da corta.

Quadro XV – Esquema dos dados de base e ferramentas utilizadas na análise cinemática

Dados de base (fontes)	Resultado obtido	Ferramenta utilizada
Levantamento de 93 descontinuidades (Roque, 2009)	Atitude das descontinuidades	<i>Dips</i> ©
Levantamento topográfico da área de estudo, cedido pela EDM(<i>in</i> Roque, 2009)	Atitude dos diversos taludes- críticos	

5.3. Modelo Geológico-geotécnico

O tratamento estatístico das atitudes registadas foi efetuado com recurso ao *software Dips*©, utilizando a projeção equivalente (de Schmidt ou de igual área) no hemisfério inferior.

Na Figura 65 ilustra-se o diagrama de densidades de fracturação, representando a concentração dos pólos das várias fracturas e identificam-se as diversas famílias consideradas para a análise e os respectivos planos médios.

Dado que a maioria das descontinuidades é quase vertical, pode analisar-se a variabilidade de atitudes dentro de cada família utilizando um diagrama em rose, na Figura 66.

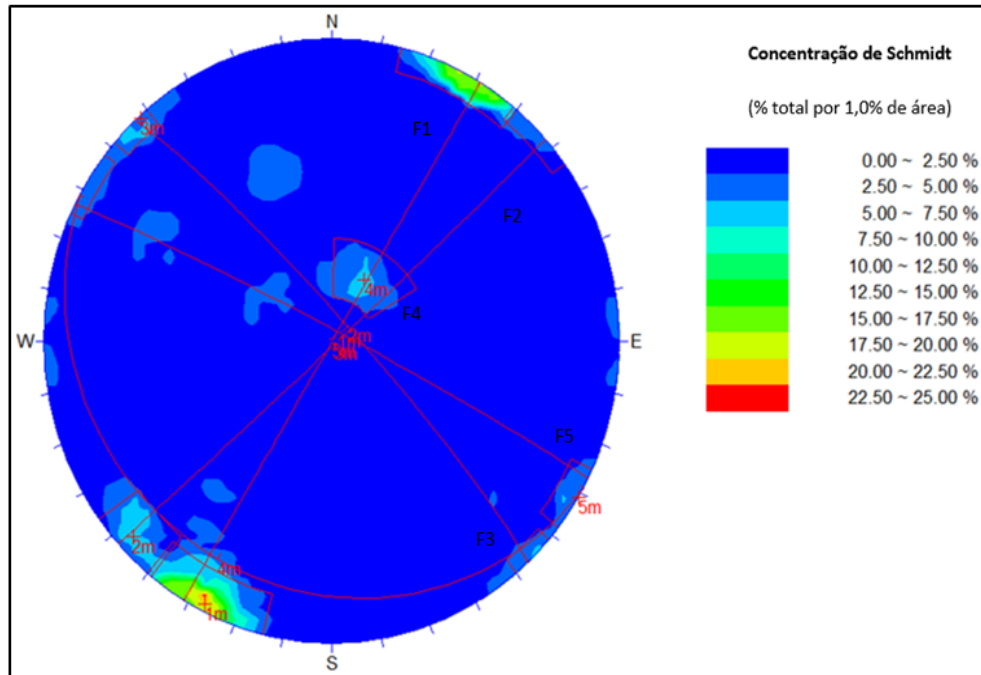


Figura 65 – Diagrama de densidade de fracturação do talude da corta (projecção estereográfica - *software Dips©*)

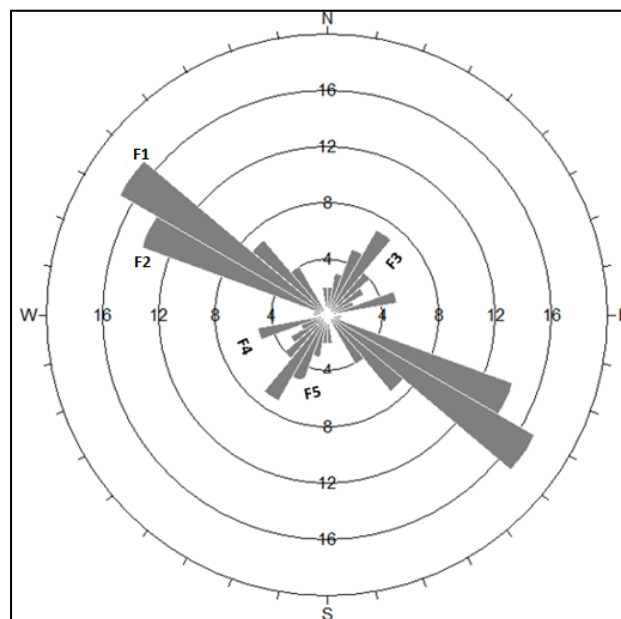


Figura. 66 – Roseta de fracturação do talude da corta (projecção estereográfica - *software Dips©*)

A observação dos diagramas permite identificar cinco famílias de descontinuidades mais frequentes: F1, F2, F3, F4 e F5 que foram reorganizadas face à organização apresentada em Roque, 2009.

No Quadro XVI estão apresentadas a atitude do plano médio de cada uma das 5 famílias consideradas.

Quadro XVI – Atitude das famílias identificadas na corta

Família	Direção (°)	Inclinação(°)	Frequência
F1	N117°E	87°NE	25%
F2	N137°E	84°NE	7.5%
F3	N48°E	89°E	7.5%
F4	N119°E	18°SW	7.5%
F5	N31°E	90°	7.5%

As diversas famílias foram organizadas segundo a persistência, ou seja, a F1 é a mais frequente (maior número de ocorrências) e a família F5 é a menos frequente. As fracturas com uma presença igual ou inferior a 5% não foram consideradas como uma família, já que a sua frequência é muito baixa.

Para a análise cinemática atribuiu-se às descontinuidades no maciço rochoso um ângulo de atrito interno básico de 35° tendo em conta o tipo de maciço (granito) e as características das descontinuidades (com espaçamentos a variar entre F₂ e F₄, sem preenchimento, sem circulação de água e com paredes lisas e planares).

5.4. Localização dos taludes-críticos

Na corta, definiram-se 5 taludes-críticos, devido ao facto da corta apresentar a geometria que se observa na figura 56, exibindo, pelo menos cinco direções de talude. Uma vez que o programa *Dips*© assume características homogêneas para cada trecho do maciço e distribui o sistema de fracturação por toda a área analisada, as ocorrências de movimentos estão associadas à intersecção das famílias de fracturas e à geometria dos diversos perfis-críticos (direção, inclinação e altura).

Na Figura 67 está ilustrada a localização dos 5 perfis-críticos empregados na análise cinemática.

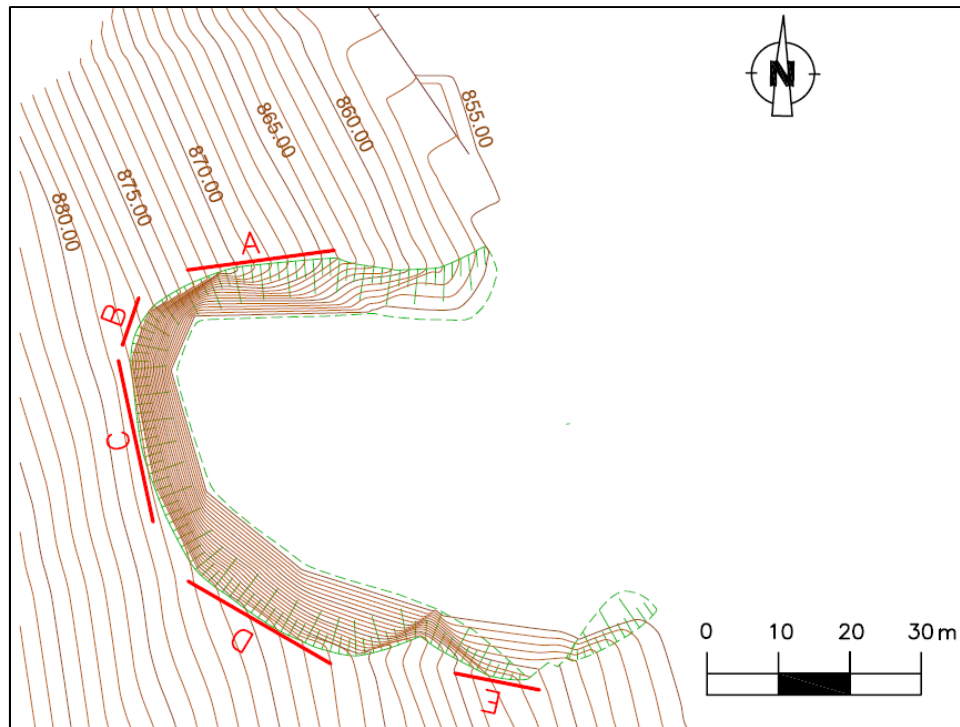


Figura 67 – Localização dos 5 perfis-críticos definidos para a corta

No Quadro XVII estão apresentadas as características mecânicas dos diversos taludes-críticos da corta identificados.

Quadro XVII – Atitude e altura dos taludes-críticos da corta

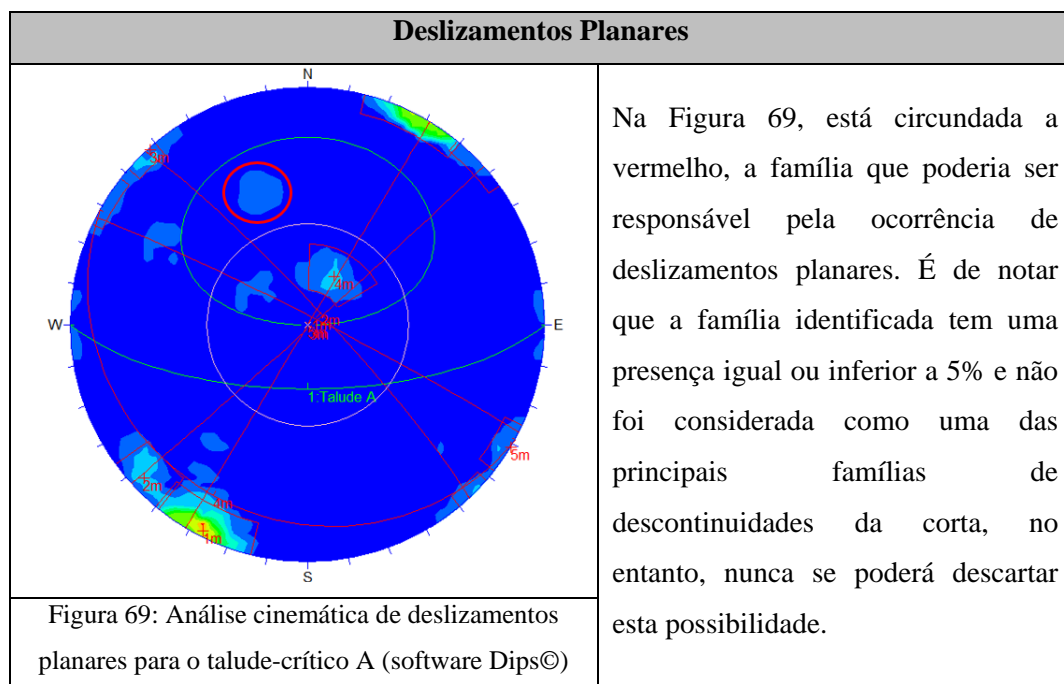
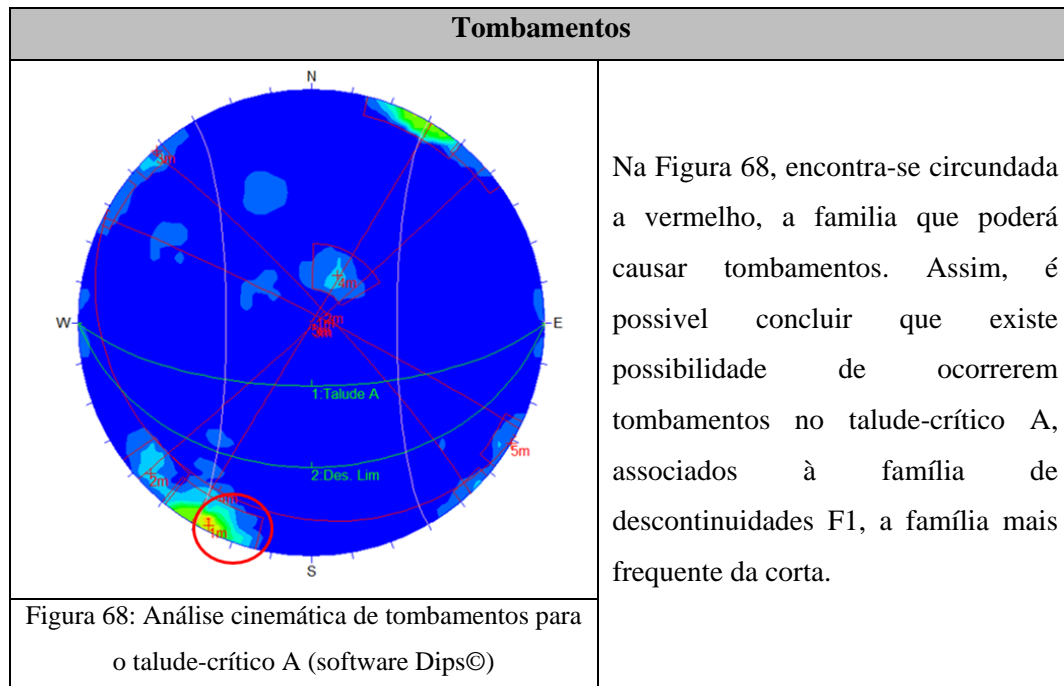
Talude-crítico	Direção (°)	Inclinação (°)	Altura (m)
A	E-W	68S	15
B	N25E	60SE	26
C	N16W	73NE	23
D	N55W	66NE	19
E	N67W	49NE	8

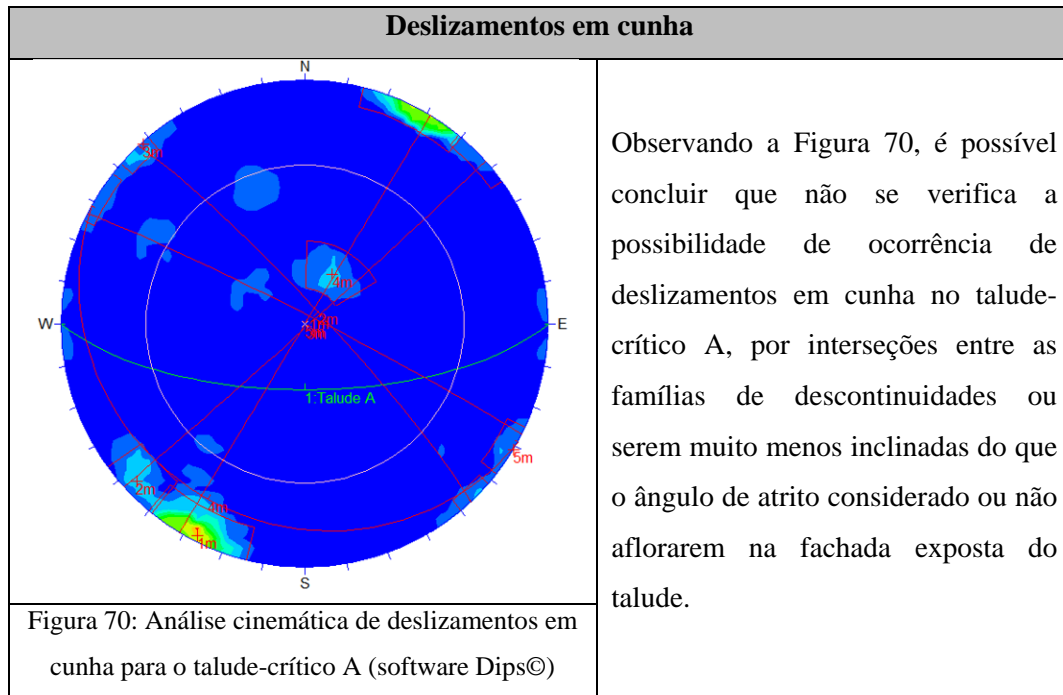
5.5. Análise cinemática

Seguidamente estão apresentados os resultados obtidos da análise cinemática, dos 5 taludes-críticos identificados, A, B, C, D e E.

- Talude-crítico A:

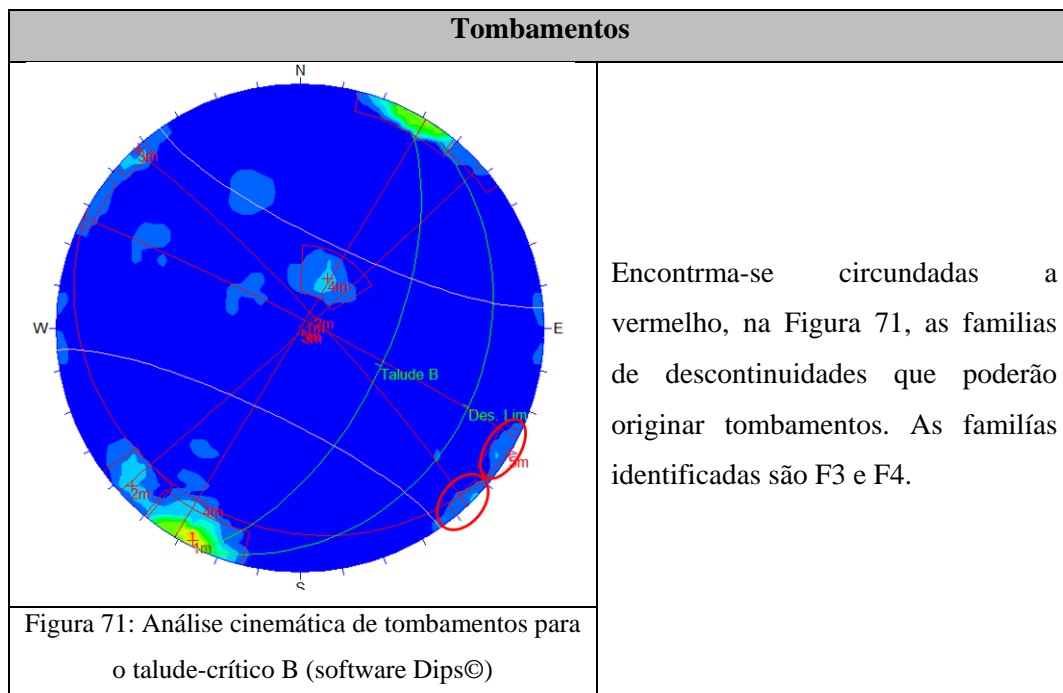
Após efetuar a análise cinemática do talude-crítico A, obtiveram-se as figuras 68, 69 e 70. Junto de cada figura encontra-se a respectiva discussão de resultados para os diferentes tipos de movimentos de massa.

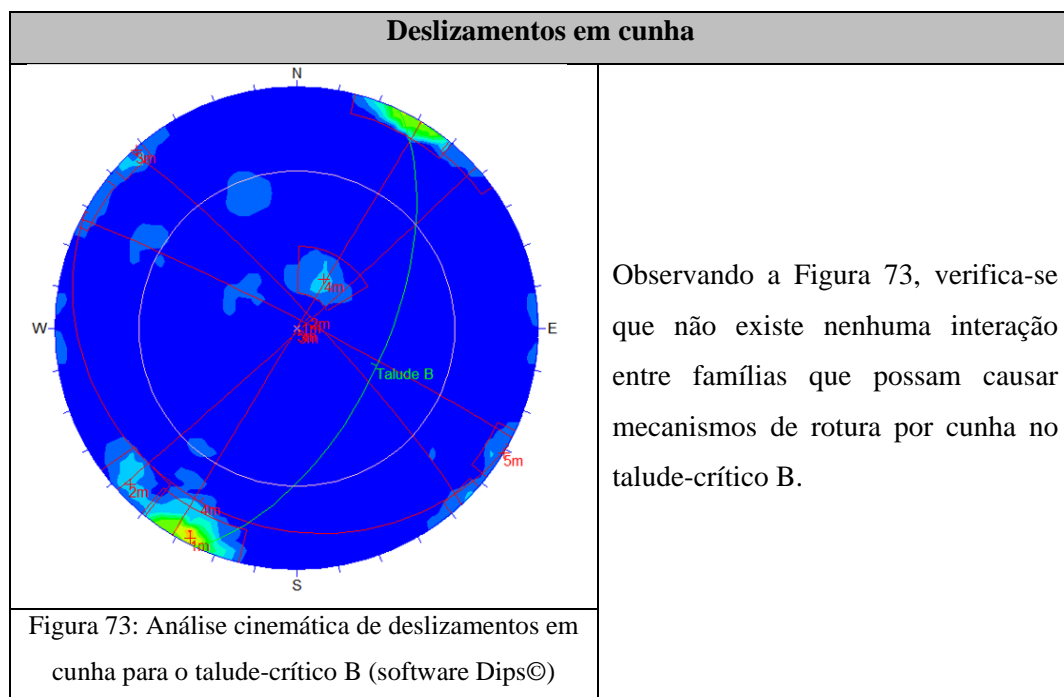
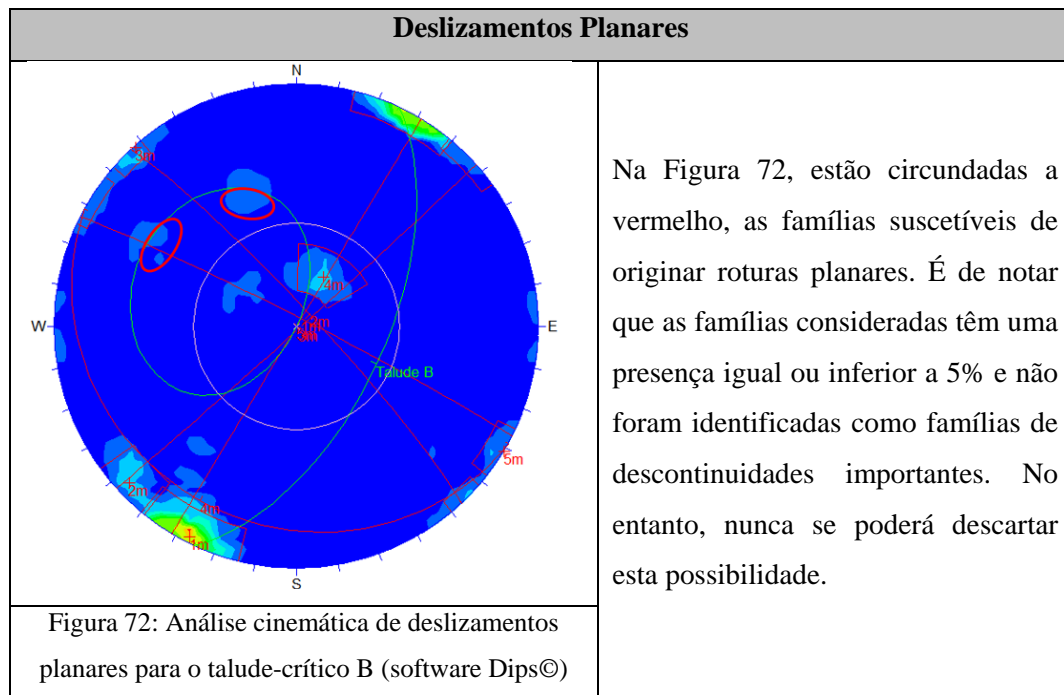




- Talude-crítico B

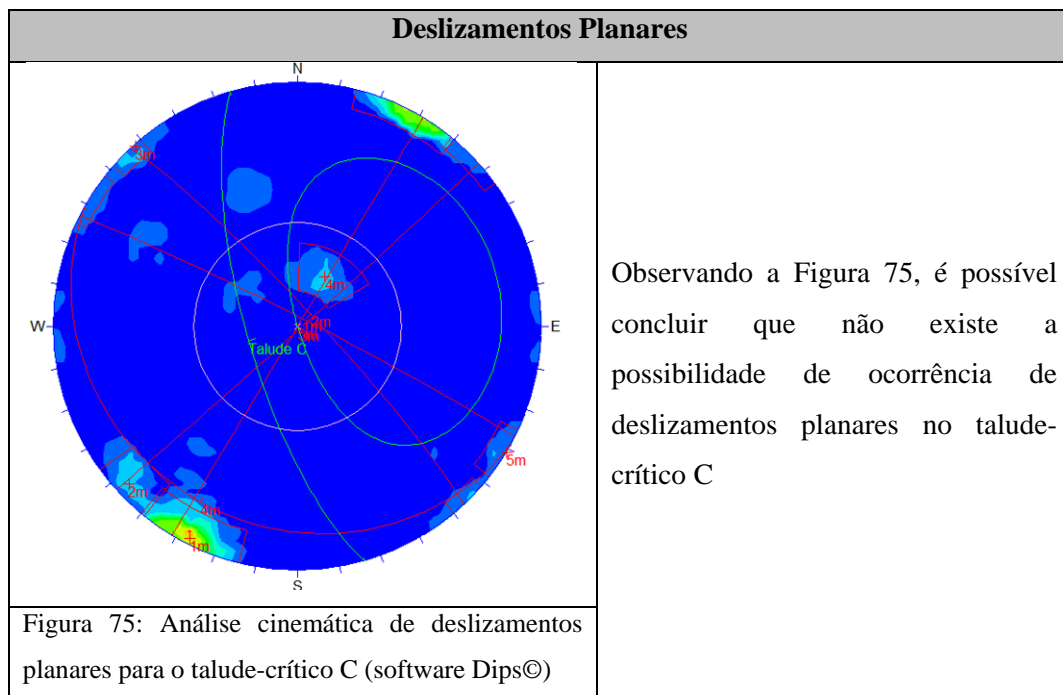
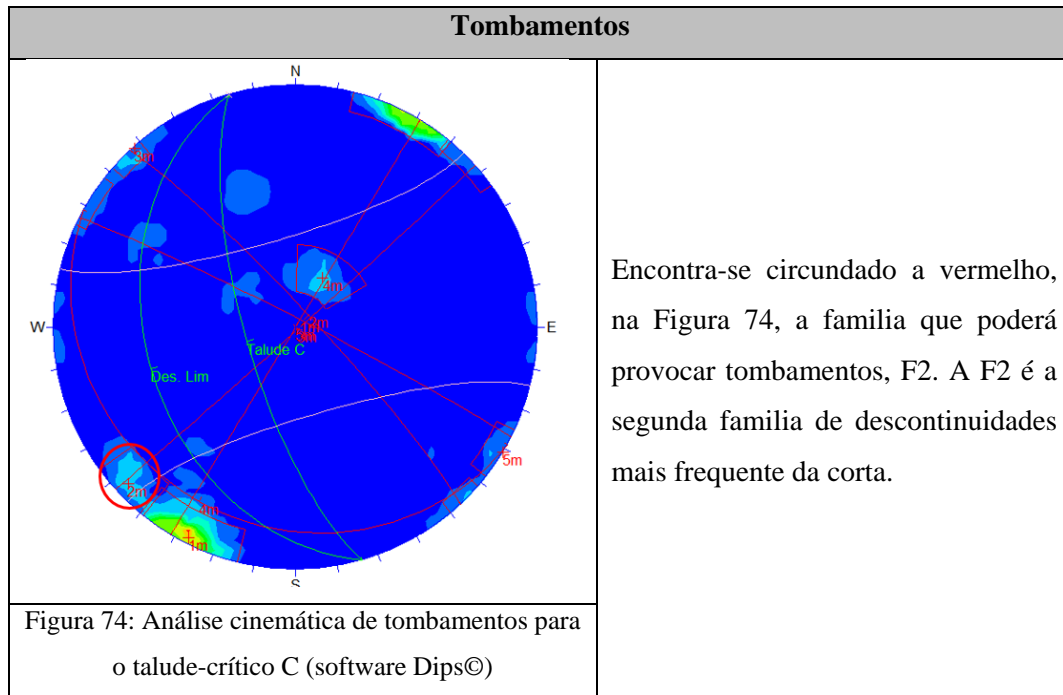
Seguidamente, estão apresentados os resultados das simulações do *software Dips*© para o talude-crítico B nas figuras 71, 72 e 73. Junto de cada figura encontra-se a respetiva discussão de resultados para os três tipos de movimentos de massa.

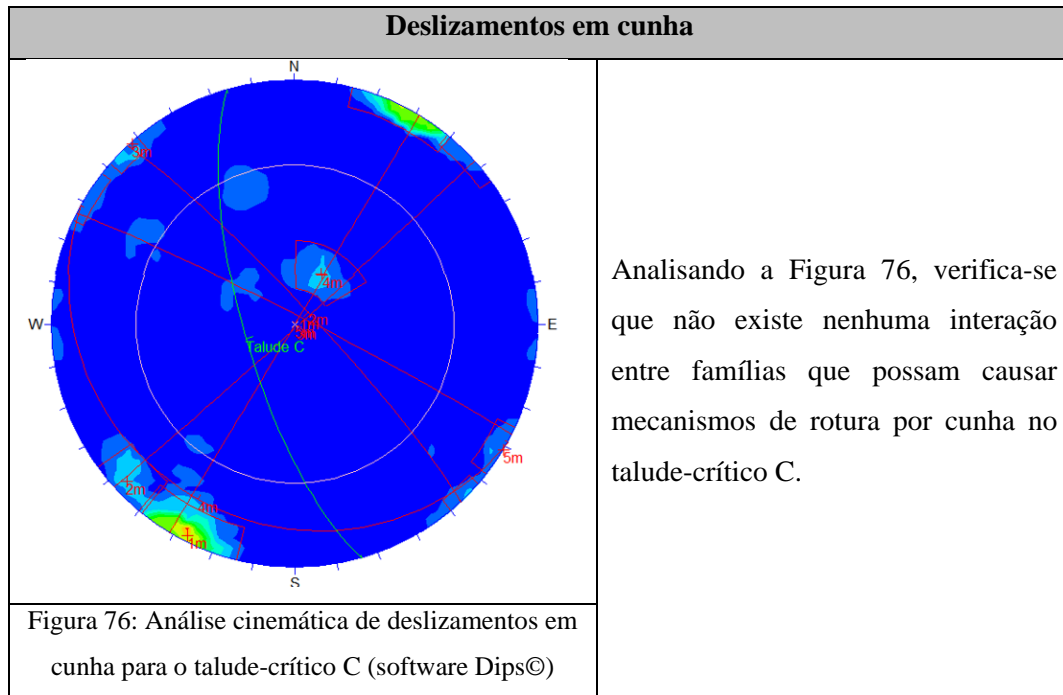




- Talude-crítico C

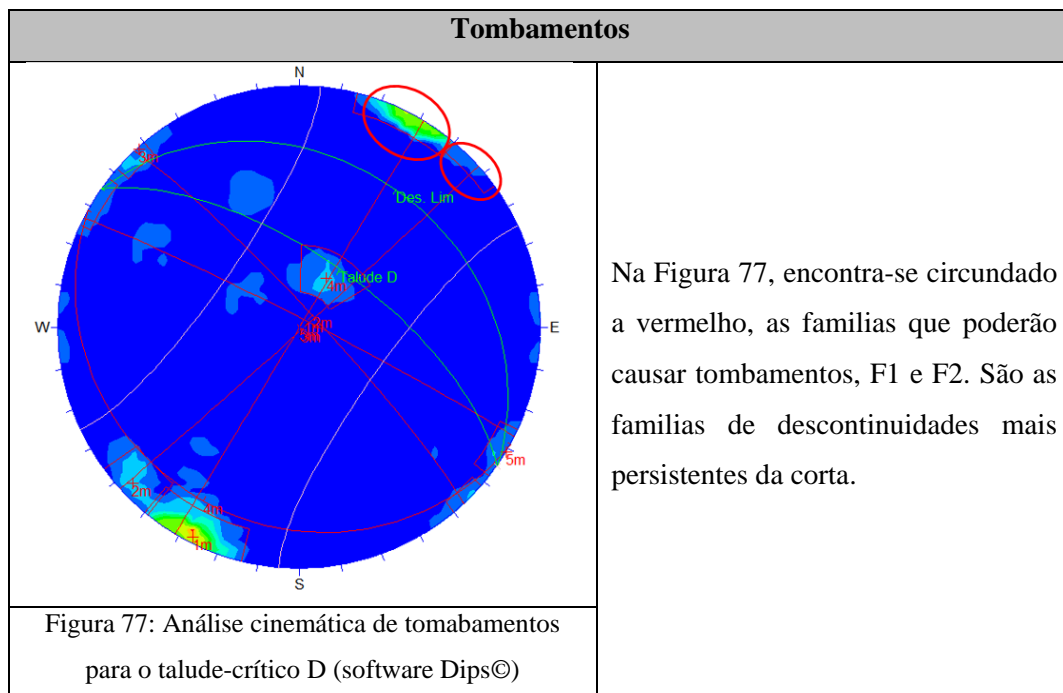
Após efetuar a análise cinemática do talude-crítico C, obtiveram-se as figuras 74, 75 e 76. Junto de cada figura encontram-se os seus respetivos comentários para os diferentes movimentos de massa.

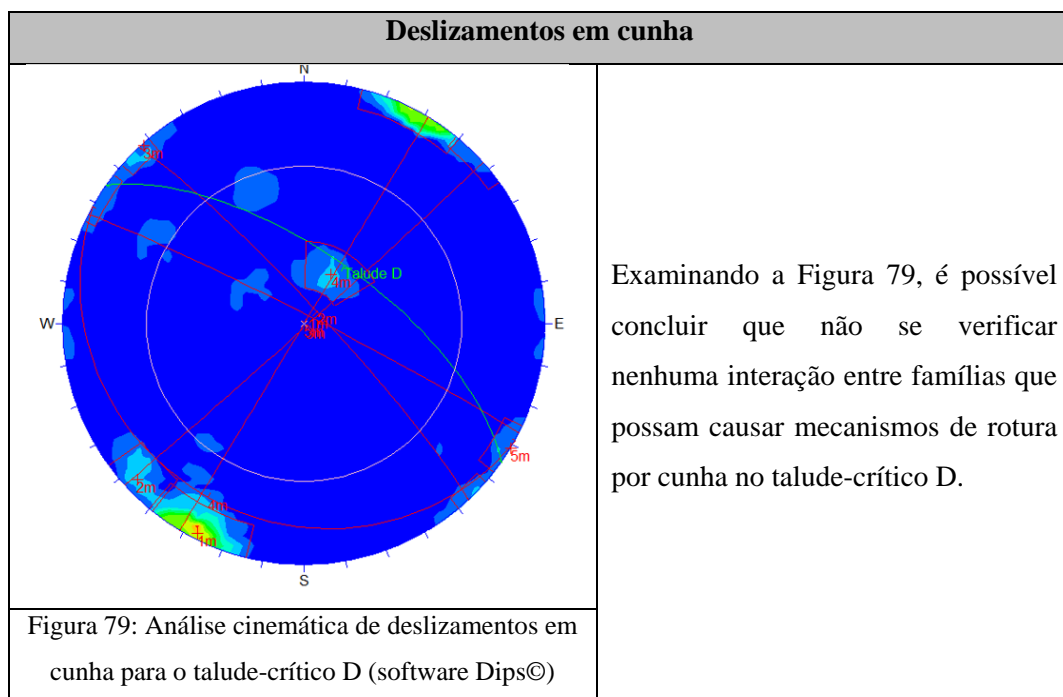
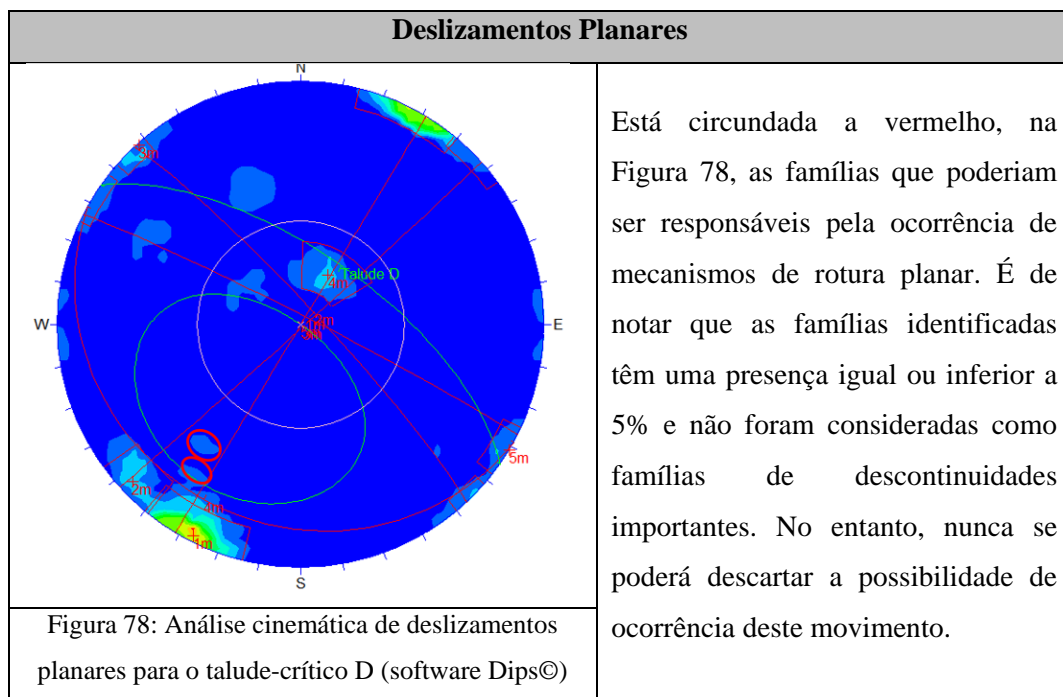




- Talude-crítico D

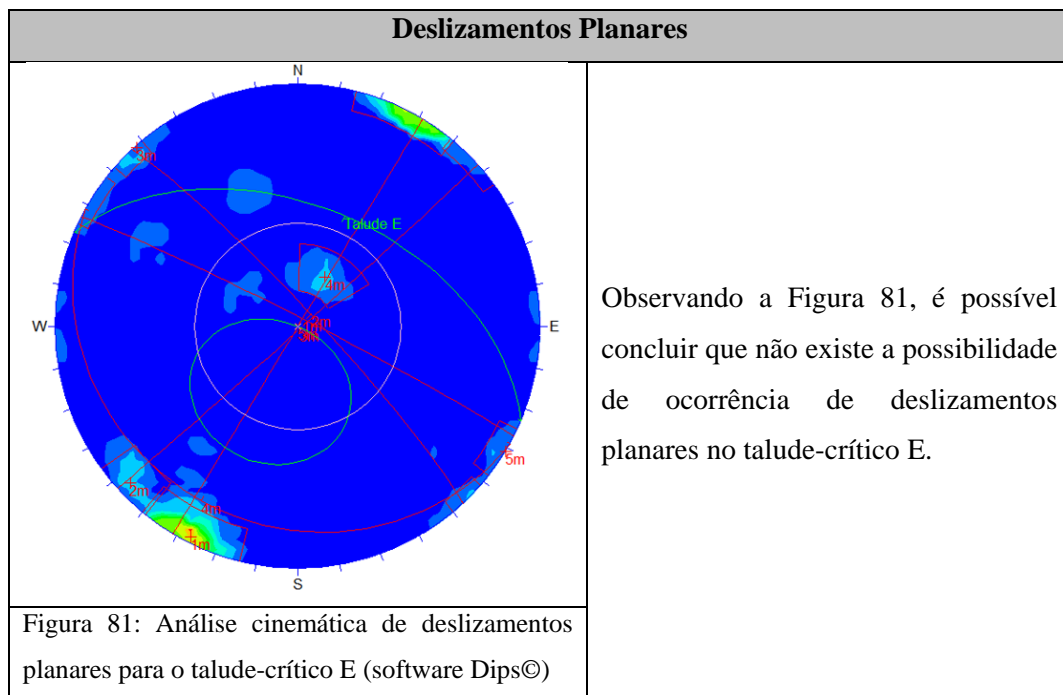
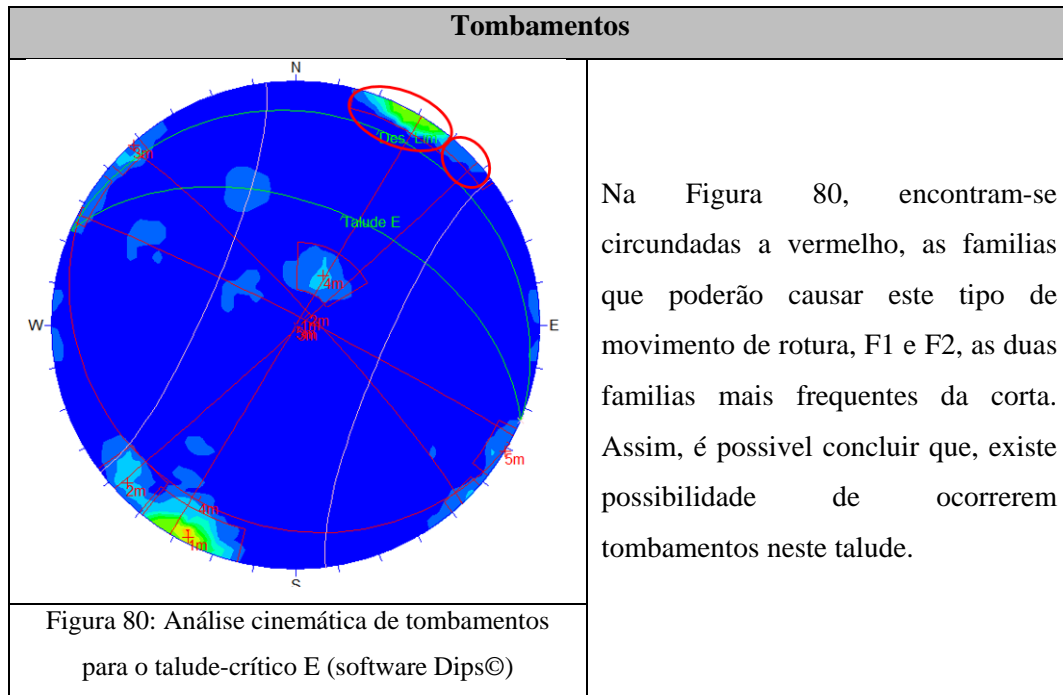
Após efetuar a análise cinemática do talude-crítico D, obtiveram-se as figuras 77, 78 e 79. Junto de cada figura encontra-se a respetiva discussão de resultados para os diferentes tipos de movimentos de massa.

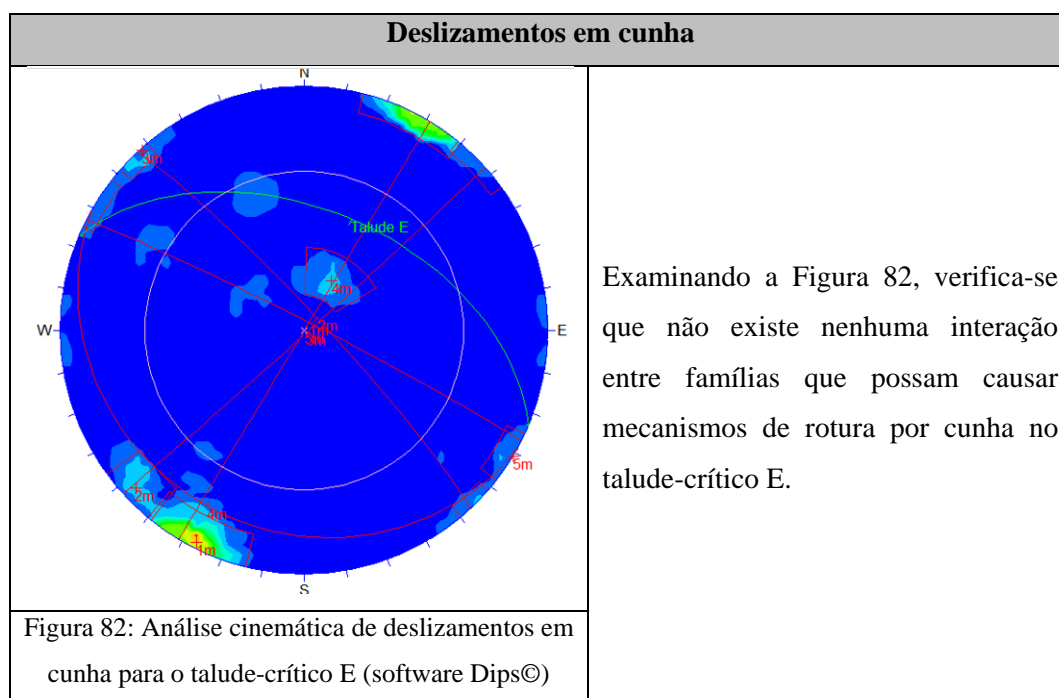




- Talude-crítico E

Após efetuar a análise cinemática do talude-crítico E, obtiveram-se as figuras 80, 81 e 82. Junto de cada figura encontram-se a os seus respectivos comentários para os três tipos de movimentos de massa analisados.





5.6. Discussão de resultados

Segundo a análise cinemática, todos os taludes-críticos estão sujeitos a tombamentos. Importa comentar que os tombamentos são pouco típicos de maciços graníticos. A verificar-se tal situação apenas na presença de fracturas subverticais e com espaçamento apertado a aberto (0,1-2,5mm), onde Roque, 2009, classificou as famílias F1 e F2 como próximas (20-200mm).

Quanto ao estudo de deslizamentos por cunha, é importante realçar que estes são muito comuns no maciço granítico, pelo que a hipótese da sua ocorrência não deve ser desconsiderada. Admite-se que a não identificação deste tipo de movimentos de rotura possa estar associada ao facto da análise cinemática efetuada se ter baseado nos planos médios das famílias de discontinuidades. Assim, considera-se que é possível que ocorram escorregamentos por cunha associados a algumas discontinuidades, tendo em conta a variabilidade de atitudes (inclinação e direção) de cada família. A corroborar esta hipótese apresenta-se na Figura 83, a vermelho, a localização de traços de blocos em cunha, após um deslizamento, no encontro entre os taludes-críticos C e D.

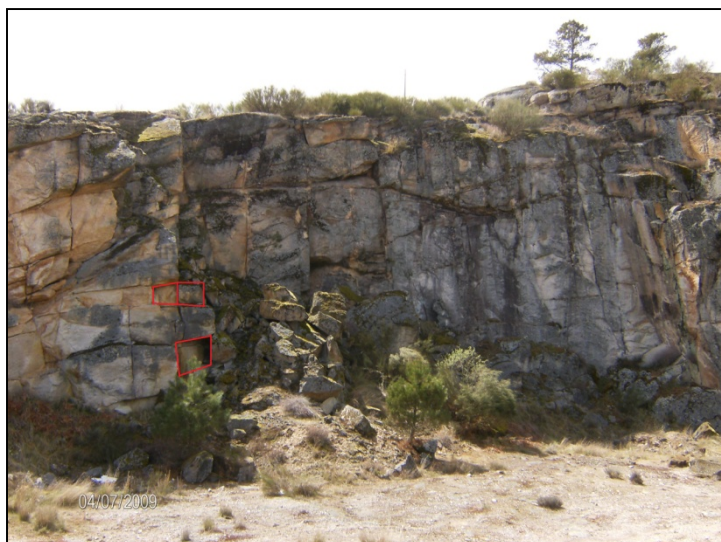


Figura 83: Evidência de deslizamentos em cunha (circundadas a vermelho)
no encontro entre os taludes-críticos C e D

Apreciando os resultados da análise cinemática efetuada nos taludes-críticos A, B e D podem-se verificar escorregamentos planares. Face à inclinação dos taludes este maciço não está muito sujeito à ocorrência destes mecanismos de rotura.

Nestes resultados, é necessário ter em conta que, apenas se identificou uma família subhorizontal. A dificuldade em levantar descontinuidades subhorizontais pode estar relacionada com o facto do maciço se encontrar bastante alterado, dificultando o levantamento sistemático deste tipo de fracturação que se encontram, provavelmente, associados à descompressão do maciço resultante do desmonte.

Uma análise de estabilidade, recorrendo ao cálculo dos fatores de segurança, utilizando programas informáticos apropriados poderá ajudar na interpretação dos resultados e avaliar a perigosidade que cada tipo de fenómeno de instabilidade considerado pode representar.

5.7. Medidas de estabilidade propostas para os diversos taludes-críticos da corta

As medidas de reabilitação recomendadas para a corta da área mineira de Santo António são compatíveis com várias aspetos e características da área, condições de segurança ideais, a altura do talude, o impacto paisagístico da solução final e questões de funcionalidade, quer em fase de obra, quer a longo prazo (ex. monitorização de estabilidade).

O facto de ser uma área privada, cerca de 2000m², com acesso limitado e de representar uma indústria com potencial reutilização também influencia a escolha adequada destas ações.

Posto isto, não é exequível nem funcional propor medidas talude-a-talude, que apresentem um carácter dispendioso e recorrer a medidas preventivas (redes e muros de

proteção), deve-se sim recorrer a medidas de correção e reforço de taludes, afinal trata-se de uma reabilitação e não de uma prevenção. As medidas a adotar têm que garantir a estabilidade no caso de retoma da atividade de extração mineira.

As medidas de estabilidade propostas para os diversos taludes-críticos da corta passam por desmontes controlados, pregagens e eventuais ancoragens em descontinuidades mais desfavoráveis à estabilidade, com aplicação de sistemas de drenagem otimizados e adequados (internos e externos) e medidas de prevenção contra a erosão e arrastamento pelas águas pluviais, em especial ao longo das ravinas, de materiais arrastados dos depósitos de resíduos ES1 e ES2 e a sua dispersão nas zonas a jusante.

Para verificar a aplicabilidade destas medidas seria necessário uma análise de estabilidade. Também seria interessante um estudo de qualidade do maciço com por exemplo o cálculo do Índice SMR e/ou RMR detalhado para os diferentes taludes-críticos da corta e observar de relance as recomendações de Romana (1993).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área mineira de Santo António, caso de estudo desta dissertação, encontra-se em avançado estado de degradação representando uma elevada perigosidade geotécnica e ambiental.

Do ponto de vista geotécnico salientam-se as duas principais unidades de acumulação de resíduos mineiros (escombreiras ES1 e ES2) e a presença de uma corta com grandes indícios de instabilidade.

No âmbito da dissertação realizou-se a análise de estabilidade dos dois depósitos de resíduos, segundo diversos perfis-críticos, e a análise cinemática dos taludes da corta, que face à sua geometria integrava taludes-críticos com direção e inclinação diferentes.

Na análise de estabilidade recorreu-se ao software Slope/W segundo o método de Morgenstern e Price e ao software Seep/W.

Foram modelados quatro perfis-críticos para a análise de estabilidade da escombreira ES1 e dois para a ES2. Consideraram-se perfis-críticos, aqueles que apresentavam maior altura e/ou maior inclinação já que estes, à partida, são os que apresentam condições mais desfavoráveis à estabilidade.

Simularam-se duas situações, uma que representa a situação atual dos depósitos e outra que representa a solução de estabilização correspondente ao reperfilamento dos taludes.

No que respeita à parametrização dos materiais para construção do modelo analítico, foram considerados os parâmetros ângulo de atrito interno efetivo - ϕ' , a coesão efetiva - c' e o peso volúmico saturado - γ_{sat} .

Para a fundação foram atribuídos, tendo por base o conhecimento adquirido em maciços rochosos similares e em ambientes semelhantes, valores de $\phi' = 40^\circ$, de $c' = 22 \text{ kPa}$ e de $\gamma_{sat} = 22 \text{ kN.m}^{-3}$.

As características geotécnicas dos depósitos de resíduos (ES1 e ES2) foram definidas a partir da análise dos diversos dados de campo e resultados de ensaios laboratoriais disponíveis na tese de doutoramento que precede esta dissertação. Admitiu-se para a ES1, $\gamma_h = 14 \text{ (kN.m}^{-3}\text{)}$ e para a ES2 $\gamma_h = 15,6 \text{ (kN.m}^{-3}\text{)}$.

Para parametrização da coesão, realizou-se uma análise de sensibilidade partindo dos valores de base obtidos nos ensaios laboratoriais, pois este é um dos parâmetros mais complexos de determinar. Verificou-se que a coesão tem uma grande influência na estabilidade de taludes, tendo-se verificado que com uma oscilação de apenas 2kPa registavam-se alterações significativas nos valores de Fatores de Segurança obtidos. Face às características granulométricas dos materiais de ambos os depósitos ES1 e ES2, admitiu-se que a coesão

exibida era aparente e que se devia essencialmente às ligações ferruginosas e a tensões capilares negativas nos contactos intergranulares. Por conseguinte, para o modelo analítico admitiu-se um valor de coesão nulo, considerando-se a assim na análise de estabilidade a situação mais desfavorável.

Quanto ao ângulo de atrito destes materiais verificou-se que a ES1 apresenta $\phi_{ES1}=36^\circ$ e a ES2 apresenta $\phi_{ES2}=38^\circ$ segundo os ensaios de campo e resultados de ensaios laboratoriais disponíveis na tese de doutoramento que precede esta dissertação. Esta observação é corroborada pelas inclinações dos taludes naturais destes materiais, que são geralmente da ordem de 35° a 42° . A inclinação destes deve-se essencialmente às características friccionais dos materiais, com pequeno contributo de coesão.

Relativamente ao nível freático (NF), na ausência de dados que permitissem conhecer a sua posição e tendo em conta que esta poderá variar ao longo do ano, optou-se por considerar três situações possíveis: uma em que o NF se encontra na base da escombreira, outra em que se localiza a meio dos depósitos de resíduos e, por último, considerou-se o NF perto da superfície, aproximadamente a $\frac{1}{4}$ da superfície, que representa a situação de estabilidade possível mais crítica.

Nos resultados da análise de estabilidade da situação atual verificou-se que todos os perfis-críticos da ES1 estão em situação de potencial instabilidade ($FS < 1,25$) exceto o perfil D, onde a estabilidade só se verifica quando o NF se localiza na base da ES1. Admite-se então, que nenhum dos taludes se encontra estável, pois não se obtiveram valores de FS superiores ou iguais a 1,5.

No caso da ES2 admitiu-se que ambos os perfis-críticos encontram-se instáveis, embora o perfil-crítico E se encontrasse estável quando o NF se localiza na situação à partida menos desfavorável (na base do depósito).

Assim, a ES1 apresenta um perigo geotécnico superior do que a ES2. Isto pode dever-se ao facto da ES1 apresentar um volume bastante superior ao da ES2 e, por sua vez, uns taludes mais íngremes.

Em ambos os depósitos de resíduos ES1 e ES2 conclui-se que a altura do talude, a inclinação da sua zona crítica, e a posição do nível freático são condicionantes da respetiva estabilidade.

Posteriormente realizou-se uma análise de estabilidade que pretende simular a solução de estabilização correspondente ao reperfilamento dos taludes. A geometria do reperfilamento teve em conta, além de um valor de FS compatível com condições de segurança ideais, a altura do talude, o impacto paisagístico da solução final e questões de funcionalidade, quer em fase de obra, quer a longo prazo (ex. monitorização das soluções de estabilidade e manutenção).

A análise de estabilidade na situação do reperfilamento dos taludes não foi realizada para a totalidade dos perfis-críticos considerados na análise da situação atual, tendo-se simulado

apenas, em cada depósito, o perfil-crítico que apresentava condições de estabilidade mais desfavoráveis. Assim, para o depósito de resíduos ES1, procedeu-se à modelação do perfil-crítico C e para o depósito de resíduos ES2, o perfil-crítico E.

Após a modelação de várias soluções de estabilidade conclui-se que a solução mais adequada para ES1 é o reperfilamento dos taludes com uma inclinação 1(V):2(H), com banquetas de 3m de largura a cada 6m de altura e com drenos de 6 m de comprimento, dispostos em malha quadrada, espaçados em 1,5 m, a começar a 0,5 m acima da base dos taludes. Para a ES2 a solução de estabilidade mais adequada é o reperfilamento dos taludes com uma inclinação 1(V):2(H), com uma banquetta de 3m aos 4m, no entanto, recomenda-se a colocação de sistema de drenagem interna, drenos de 6 m de comprimento, dispostos em malha quadrada, espaçados em 1,5 m, a começar a 0,5 m acima da base dos taludes considerando-se assim a situação mais favorável à estabilidade.

Estas soluções de mitigação contribuiriam significativamente para a diminuição do perigo geotécnico da área mineira de Santo António e por conseguinte para a diminuição da perigosidade ambiental, minimizando a possibilidade de dispersão de material a partir dos depósitos de resíduos ES1 e ES2.

Na análise cinemática da corta foram analisados 5 taludes-críticos, tendo em consideração as redes de fraturação do maciço e a geometria da corta.

Para análise da fracturação do maciço recorreu-se aos levantamentos de campo existentes, que incluíam 93 descontinuidades. Foram definidas 5 famílias de fracturas principais, nomeadamente: F1 (117°, 87° NE), F2 (137°, 84° NE), F3 (48°, 89° E), F4 (119°, 18° SW) e F5 (31°, 90°). O *software* utilizado foi Dips© da *Rockscience*.

Segundo a análise cinemática realizada todos os taludes críticos estão sujeitos a tombamentos. Contudo, é necessário ter em conta que os tombamentos não são muito comuns em maciços graníticos.

A partir da observação direta dos taludes da corta é possível identificar indícios de deslizamentos em cunha, embora os resultados da análise cinemática não identifiquem tais situações. Importa referir que os deslocamentos em cunha são os movimentos de rotura mais frequentes em granitos. O facto de existir uma grande dificuldade em registar as fraturas subhorizontais no levantamento de descontinuidades pode justificar os resultados da análise cinemática.

Apreciando os resultados da análise cinemática efetuada nos taludes-críticos A, B e D podem-se verificar escorregamentos planares, no entanto, estes mecanismos de rotura são pouco possíveis face à inclinação dos taludes.

As técnicas de contenção recomendadas para os diversos taludes-críticos da corta consistem em desmontes controlados, pregagens e eventuais ancoragens em zonas mais

desfavoráveis à estabilidade, com aplicação de sistemas de drenagem otimizados e adequados (interiores e exteriores).

Com a aplicação destas soluções de correção o perigo geotécnico da área mineira de Santo António diminuiria significativamente.

A autora considera que seria interessante, num trabalho futuro, realizar algumas ações que poderiam melhorar significativamente o estudo do perigo geotécnico da área mineira de Santo António.

Quanto à análise de estabilidade dos depósitos de resíduos ES1 e ES2 propõe-se a implementação de um modelo hidrogeológico, à escala local, que permita avaliar a variação temporal e espacial do nível piezométrico resultante das recargas e a sua articulação com modelos hidrológicos superficiais de escoamento/infiltração, que possibilitem tratar de forma mais rigorosa os efeitos do NF na instabilização dos depósitos de resíduos e talvez fosse gratificante explorar outras ferramentas computacionais de modo a corroborarem os resultados obtidos.

No que diz respeito à análise cinemática dos taludes da corta sugere-se um levantamento de descontinuidades, mais detalhado, para os diferentes taludes-críticos e não para a corta em geral, já que estes podem apresentar comportamentos distintos; o cálculo do Índice SMR e/ou RMR detalhado para os diferentes taludes-críticos da corta e uma interpretação das recomendações de Romana (1993). Com o intuito de verificar a aplicabilidade das medidas de reabilitação preconizadas recomenda-se uma análise de estabilidade da corta, com recurso a *softwares* próprios e adequados à tipologia dos fenómenos patentes. Possivelmente também seria estimulante explorar outras ferramentas computacionais de modo a corroborarem os resultados obtidos.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMSON, L. W., LEE, T. S., SHARMA, S., BOYCE, G. M., (2002) – “*Slope stability and stabilization methods*”, John Wiley & Sons, Inc, New York, 712 pp.

BIENIAWSKI, Z. T., (1967) – “*Mechanism of brittle rock fracture: part 1 – Theory of the fracture process*”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical abstracts, 395-406 pp.

CRUDEN, D. M., (1991) – “*A simple definition of a landslide. Bulletin of Engineering Geology and the Environment*”, vol. 43, 27-29 pp.

CRUDEN, D. M., & VARNES, D. J., (1996) – “*Landslide types and processes*”, in: TURNER, A., & SCHUSTER, R., (Eds) – “*Landslides – Investigation and mitigation*”, Special Report 247, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D. C., 36-75 pp.

DIPS, (2013) – “*Graphical and statistical analysis of orientation data*”, Rocscience, <http://www.rocscience.com/products/1/Dips>, acessado a Dezembro de 2012.

DIPS, (2013) – “*Quick Start Tutorial*”, Tutorial Manual, 21pp.

DIPS, (2006) – “*Programa de desenho, análise e apresentação de dados estruturais através de técnicas de projeção estereográfica*”, Rocscience, 11 pp.

DIPS, (2005) – “*Toppling, Planar Sliding, Wedge Sliding*”, Tutorial Manual, Dips v.5.0

FELLENIOUS, W., (1936) – “*Calculation of the stability of earth dams*”, Paper D-48, 2nd Congresso on Large Dams, Washington D.C., 445-463 pp.

FERREIRA, N. & SOUSA, B., (1994) – “*Notícia Explicativa da Folha 14-B Moimenta da Beira da Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000*”, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 53 pp.

FONTINHAS, A., (2012) – “*Aplicação do SMR na avaliação da estabilidade de taludes de escavação em grauvaques da Formação de Mértola*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Costa da Caparica, 72 pp.

FREITAS, M., (2011) – “*Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 131pp.

GEOSLOPE, (2012) – “*SLOPE/W 2012*”, Slope stability analysis, acedido em Novembro 2013.

GUZZETTI, F. (2005) – “*Landslide Hazard and Risk Assessment*”, Tese de Doutoramento, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Rheinischen Friedrich Wilhelms, Universität Bonn, Bonn, 389 pp.

HOEK, E., & BRAY, J., W., (1981) – “*Rock slope engineering*”, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 pp.

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA – IGME, (1986) – “*Manual de taludes*”, Serie Geotecnia, Instituto Geológico y mineiro de España, Madrid, 456 pp.

INTERNACIONAL SOCIETY ROCK MASS - ISRM, (1978) – “*Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*”, Int. J. Rock Mechanics min. Sci. Geomech. Abstr., vol. 15, 319-368 pp.

JESUS, C., C., ALDEANO, E., CACILHAS, F., M., ALMEIDA, L., F., (2013) – Textos não Publicados – “*Caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso da arriba da Praia da Bafureira (Concelho de Cascais)*”, Relatório Prático da disciplina de Cartografia e Zonamento Geotécnico, do Mestrado Geologia Aplicada 2013/2013

MARQUES, F., M., S., F., (2013) – Textos não publicados – “*Estabilidade de Vertentes e taludes*”, Apontamentos da disciplina Geologia de Engenharia II, do Mestrado em Geologia Aplicada 2012/2013

MARQUES, F., M., S., F., (2003) – “*Resistência das rochas e dos maciços rochosos*”, Curso de especialização: Estabilidade de vertentes e taludes, Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa, 44pp.

MARQUES, R., ZÊZERE, J., TRIGO, R., GASPAR, J., TRIGO, I., (2008) – “*Rainfall Patterns and critical values associated with landslides in Povoação country (São Miguel Island, Azores): relationships with the North Atlantic Oscillation*”, Hydrological Processes, vol. 22, 478-494 pp.

NOQUEIRA, N., (2010) – “*Análise de Estabilidade de Taludes Artificiais – Técnicas e métodos para avaliação da estabilidade*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia, Lisboa, 144pp.

O’LOUGHLIN, E., M., (1986) – “*Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis*”, Water Resources Research, vol. 22, 794-804 pp.

PEREIRA, T, (2013) – “*Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra*”, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 72 pp.

PIMENTA, R., (2011) – “*Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente com métodos de base física*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia, Lisboa, 114 pp.

ROQUE, M., (2009), - “*Estudos de caracterização de área mineiras degradadas. Proposta de metodologia com aplicação à área mineira de Santo António, Penedono*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia, Lisboa, 400 pp.

ROMANA. M., (1993) – “*A geomechanical classification for slopes: slope mass rating. Rock Testing and Site Characterization*”, vol. 3, 45 pp.

SANTOS, L., (2008) – “*Estabilidade de taludes em rochas silto-argilosas. Técnicas de remediação para roturas superficiais*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia, Lisboa, 180 pp.

SNIRH, (1995) – “*Dados da precipitação de estações meteorológicas*”, Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, acedido a Janeiro de 2014.

SOUSA, F., (2013) – “*Análise dos condicionamentos à construção numa encosta com instabilidades*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia, Lisboa, 108 pp.

TERZAGHI, K., (1950) – “*Mechanism of landslide*”, in: PAIGE, S., (Ed), - “*Application of geology to engineering practice*”, The Geology Society of America, Engineering Geology, Berkeley, 83-123 pp.

VALLEJO, L., FERRER, M., ORTUÑO, L., OTEO, C., (2002) – “*Ingeniería Geológica*”, Pearson Educación, Madrid, 744 pp.

VARNES, D., J., (1978) – “*Slope Movement Types and Processes*”. In: Schuster, R. e Krizek, R. (Eds) – “*Landslides – Analysis and Control*”. Special Report 176, Transportation Research Board, National Academy of Science, Washington D.C.

VASCONCELOS, M., A., (2011) – “*Cartografia da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente em contexto urbano: O Concelho de Lisboa*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia, Lisboa, 198 pp.

ZÊZERE, J., L., FERREIRA, A., B., RODRIGUES, M., L., (1999a) – “*The role of conditioning and triggering factors in the occurrence of landslide: a case study in the area north of Lisbon (Portugal)*”, Geomorphology, vol. 30 (1-2), 133-146 pp.